



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ERICKA PATRÍCIA LIMA DE BRITO PAIVA

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CENTRO DE  
ABASTECIMENTO E LOGÍSTICA DO ESTADO DE PERNAMBUCO VISANDO A  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Recife  
2023

ERICKA PATRÍCIA LIMA DE BRITO PAIVA

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CENTRO DE  
ABASTECIMENTO E LOGÍSTICA DO ESTADO DE PERNAMBUCO VISANDO A  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Coorientadora: Profa. Dra. Alessandra Lee Barbosa Firmo.

Recife

2023

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P149e | <p>Paiva, Ericka Patrícia Lima de Brito.</p> <p>Estudo do aproveitamento de resíduos orgânicos do centro de abastecimento e logística do Estado de Pernambuco visando a produção de biogás / Ericka Patrícia Lima de Brito Paiva – 2023.</p> <p>181 f.: il., figs., tabs., abrev. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.<br/>Coorientadora: Profa. Dra. Alessandra Lee Barbosa Firmo.<br/>Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.<br/>Inclui Referências e Apêndice.</p> <p>1. Engenharia civil. 2. Digestão anaeróbia. 3. Biodegradação. 4. Resíduos orgânicos. 5. Biogás. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Firmo, Alessandra Lee Barbosa (Coorientadora). III. Título.</p> <p>UFPE</p> <p>624 CDD (22. ed.)</p> <p>BCTG/2024-50</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

ERICKA PATRÍCIA LIMA DE BRITO PAIVA

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CENTRO DE  
ABASTECIMENTO E LOGÍSTICA DO ESTADO DE PERNAMBUCO VISANDO A  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 11/08/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Fernando Fernandes (Examinador Externo)  
Universidade Estadual de Londrina

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Francisco Suetênio Bastos Mota (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Ceará

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Profa. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandes Palha (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho ao meu filho Rafael, ao meu esposo Daniel, aos meus pais Melquíades e Gerusa Brito e ao meu irmão Jefferson Brito pelo amor incondicional, pela presença constante e por não medirem esforços em me fazer feliz.

## AGRADECIMENTOS:

Ao meu grande Deus, por me mostrar a cada dia que tudo posso naquele que me fortalece! Pelas bênçãos a mim concedidas, por ter me dado forças em momentos que pensei em desistir!

Aos meus pais, Melquíades Brito e Gerusa Brito, que sempre estiveram ao meu lado, em todos os momentos da minha vida. A vocês, sempre os agradecimentos serão poucos diante de tudo o que fizeram por mim...pelo exemplo, pelo amor, pela amizade, pelo carinho. Simplesmente amo vocês!

Ao meu esposo Daniel Paiva, pelo amor, paciência, compreensão e por ter me fortalecido sempre com sua presença constante em minha vida. Te amo!

Ao meu filho Rafael, que me faz sentir o maior amor do mundo! Por me ensinar a cada dia a ser uma pessoa melhor e por ser sempre minha maior fonte de inspiração para a conquista dos meus objetivos. Te amo, filho!

Ao meu irmão Jefferson Brito e a minha cunhada Ionádja Basílio, que mesmo distante, se fazem tão presente com conselhos, incentivos e amor. E as minhas sobrinhas Isabelle e Gabriela por serem sempre motivos de alegria constante em minha vida.

As minhas tias Socorro (*in memoriam*) e Lenita por todo o carinho e presença em cada etapa da minha vida.

Ao meu orientador Fernando Jucá pelo apoio, confiança e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho, além de todo conhecimento adquirido com o Grupo de Resíduos Sólidos – GRS.

A minha co-orientadora Alessandra Firmo pela amizade, dedicação, incentivo e por sempre me ajudar em cada momento vivido.

As amigas Talita Lucena, Daniela Santana e Liliana Santos por terem dividido comigo momentos de conhecimento, dificuldades e alegrias durante todo o período de construção da tese. Meninas, a vocês meu muito obrigada sempre!

As minhas amigas de toda a vida, que sempre torceram por mim! A vocês, agradeço pelos momentos compartilhados em todos esses anos de amizade, em especial as amigas Aline Dantas, Laís Lopes, Priscila Macedo, Talita Lucena, Alessandra Lee, Alcione Moraes, Juliana Veras, Juliana Menezes e Danielle Santiago. Obrigada por tudo!

Aos amigos que fazem e fizeram parte do Grupo de Resíduos Sólidos, em especial a Antônio Brito, Maria Odete Mariano, Raliny Mota, Ana Sofia, Laís Galdino, Rafaela Moura, Adjane Damasceno, Rebeca Valença e Sávio Holanda pela amizade e apoio a mim dedicados.

Ao CEASA/PE - Recife pela confiança e colaboração de sempre para a execução deste projeto, em especial ao Diretor Paulo de Tarso, a Engenheira Fátima Gonçalves e a todos que fazem parte dos setores de Engenharia e Manutenção.

A todos que trabalharam na confecção e operação do biodigestor anaeróbio, em especial à Sr. Gilberto, Sr. Marcos e Sr. Marconi.

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), junto ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil pela estrutura concedida para a realização do doutorado.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo financiamento da infraestrutura necessária para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na conclusão de meu objetivo.

## RESUMO

A aplicação de biodigestores para tratamento de resíduos sólidos orgânicos, com o intuito de aproveitar o biogás gerado é uma prática globalmente reconhecida e tem demonstrado resultados positivos em termos de gestão eficiente, economia e benefícios ambientais. Nesse contexto, a relevância deste estudo reside na avaliação da viabilidade técnica da implementação da tecnologia de digestão anaeróbia para tratar os resíduos de frutas e verduras provenientes do Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco (CEASA/PE - Recife), por meio de um sistema de biodigestão em escala piloto com volume total de 20 m<sup>3</sup>. Esse sistema inclui esteira de seleção, esteira de taliscas, moinho triturador, tanque de mistura, dois tanques de hidrólise/acidificação e um tanque de metanização que podem trabalhar em série ou em paralelo, sistema de tratamento de gases, gasômetro, secador, flare e grupo motogerador, além de bombas de engrenagem, tubulações, quadro de comando, válvulas e instrumentações. Como forma de subsidiar a partida e operação eficiente deste sistema, conduziram-se os seguintes estudos: (1) ensaios de análise gravimétrica da composição dos resíduos nos quatro principais galpões de comercialização de frutas e verduras do CEASA/PE - Recife (2) caracterização físico-química dos cinco resíduos de maior frequência de aparecimento; (3) avaliação do potencial de geração de biogás através de ensaios de BMP dos cinco resíduos selecionados utilizando lodo anaeróbio e rúmen bovino como inóculo; (4) avaliação dos parâmetros cinéticos a partir das curvas de produção de biogás, ajustando nos modelos de Primeira Ordem, Logístico Modificado, Gompertz Modificado, Cone e Fitzhugh; (5) avaliação da estabilidade operacional do sistema de biodigestão com recirculação do digestato. Os resultados iniciais de composição gravimétrica apresentaram um elevado percentual de resíduos de pimentão, tomate, laranja, beringela e folhosos/hortaliças. A avaliação do coeficiente de biodegradação no tempo indicou que os resíduos de pimentão ( $R_{C/L} = 0,21$ ) se aproximam dos resíduos envelhecidos. Por outro lado, os resíduos de tomate ( $RC/L = 3,25$ ), beringela ( $RC/L = 5,12$ ), laranja ( $RC/L = 1,59$ ) e folhosos/hortaliças ( $RC/L = 7,06$ ), revelaram índices de biodegradabilidade comparáveis aos de resíduos mais recentes. Após a execução dos ensaios de Produção Máxima de Biogás (BMP), constatou-se que para todas as combinações de substrato e inóculos, a taxa máxima de geração de biogás ocorreu nas primeiras 24 horas após a incubação. Em campo, o comportamento da composição do biogás obtido no sistema ao longo do estudo atingiu 90% de CH<sub>4</sub> quando a COV foi de 0,67 kgSV/m<sup>3</sup>/dia. Foi possível estimar que com os resultados obtidos seria possível uma geração de 1135,66 kWh de energia elétrica durante o período em estudo.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; biodegradação; resíduos orgânicos; biogás.

## ABSTRACT

The application of biodigesters to treat organic solid waste, with the aim of taking advantage of the biogas generated, is a globally proven practice and has demonstrated positive results in terms of efficient management, economy and environmental benefits. In this context, the relevance of this study lies in the evaluation of the technical forecast for the implementation of anaerobic digestion technology to treat fruit and vegetable waste from the Pernambuco Supply and Logistics Center (CEASA/PE - Recife), through a system of biodigestion on a pilot scale with a total volume of 20 m<sup>3</sup>. This system includes selection conveyor, flight conveyor, crusher mill, mixing tank, two hydrolysis/acidification tanks and a methanization tank that can work in series or in parallel, gas treatment system, gasometer, dryer, flare and motor-generator group, as well as gear pumps, piping, control panel, valves and instrumentation. As a way of supporting the start-up and efficient operation of this system, we conducted the following: (1) gravimetric analysis tests on the composition of waste in the four main fruit and vegetable handling warehouses at CEASA/PE - Recife (2) physical characterization chemistry of the five residues with the highest frequency of appearance; (3) assessment of the biogas generation potential through BMP tests of the five selected wastes using anaerobic sludge and bovine rumen as inoculum; (4) evaluation of kinetic parameters based on biogas production curves, adjusting in First Order, Modified Logistic, Modified Gompertz, Cone and Fitzhugh models; (5) assessment of the operational stability of the biodigestion system with digestate recirculation. Initial gravimetric composition results included a high percentage of residues from peppers, tomatoes, oranges, eggplants and leafy vegetables/vegetables. The evaluation of the biodegradation coefficient over time indicated that pepper residues ( $RC/L = 0.21$ ) are close to aged residues. On the other hand, waste from tomatoes ( $RC/L = 3.25$ ), eggplant ( $RC/L = 5.12$ ), orange ( $RC/L = 1.59$ ) and leafy vegetables/vegetables ( $RC/L = 7.06$ ), revealed biodegradability rates comparable to more recent residues. After carrying out the Maximum Biogas Production (BMP) tests, it was found that for all substrate and inoculum transplants, the maximum rate of biogas generation occurred in the first 24 hours after incubation. In the field, the behavior of the biogas composition obtained in the system throughout the study reached 90% CH<sub>4</sub> when the COV was 0.67 kgSV/m<sup>3</sup>/day. It was possible to estimate that with the results obtained it would be possible to generate 1135.66 kWh of electrical energy during the period under study.

Keywords: anaerobic digestion; biodegradation; organic waste; biogas.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Representação de abordagens da biomassa por recursos e por demanda                                                                            | 27 |
| Figura 2 -  | Matérias primas da biomassa.....                                                                                                              | 27 |
| Figura 3 -  | Representação Esquemática da Decomposição Anaeróbia.....                                                                                      | 31 |
| Figura 4 -  | Principais gases gerados ao longo do tempo nas diferentes fases da<br>degradação.....                                                         | 32 |
| Figura 5 -  | Relação entre o tipo de tratamento e a utilização final do biogás.....                                                                        | 40 |
| Figura 6 -  | Resumo geral do aproveitamento do biogás através de diferentes<br>práticas.....                                                               | 42 |
| Figura 7-   | Matriz de processos com base no uso final do digestato.....                                                                                   | 44 |
| Figura 8 -  | Plantas de biogás instaladas na Europa no ano de 2019.....                                                                                    | 46 |
| Figura 9 -  | Evolução do número de plantas de biometano distribuídas na Europa<br>entre os anos de 2011 e 2017.....                                        | 47 |
| Figura 10 - | Crescimento do volume de biogás para uso energético no Brasil entre<br>os anos de 2011 e 2021.....                                            | 48 |
| Figura 11 - | Classificação dos biodigestores por tipos de processos.....                                                                                   | 50 |
| Figura 12 - | Classificação das tecnologias da digestão anaeróbia para diferentes<br>parâmetros.....                                                        | 50 |
| Figura 13 - | Biodigestores anaeróbios em diferentes estágios.....                                                                                          | 55 |
| Figura 14 - | Diferentes tipos de equipamentos para ensaios de BMP (a) reator BMP<br>de borossilicato, (b) reator BMP do tipo inox (c) reator AMPTS II..... | 57 |
| Figura 15 - | Reator de metanização para tratamento de resíduos orgânicos da<br>UFMG.....                                                                   | 58 |
| Figura 16 - | Reatores piloto de escala intermediária utilizados por Valença (2017):<br>(a) imagem real; (b) croqui de projeto.....                         | 59 |
| Figura 17 - | Reator piloto em escala intermediária com capacidade de 200 L.....                                                                            | 60 |
| Figura 18 - | Planta piloto de metanização de RSO da UFSC.....                                                                                              | 61 |
| Figura 19 - | Sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos da<br>UFMG.....                                                                        | 62 |
| Figura 20 - | Planta de Biodigestão Anaeróbia localizada no Shopping Camará – PE.                                                                           | 64 |
| Figura 21 - | Unidade de Demonstração de Biogás e Biometano de Itaipu.....                                                                                  | 65 |
| Figura 22 - | Sistema de Metanização de RSU localizada na ETR – Cajú.....                                                                                   | 66 |

|             |                                                                                                                                                                           |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 23 - | Localização dos CEASAs no Brasil.....                                                                                                                                     | 69  |
| Figura 24 - | Classificação Anual de Comercialização para Produtos Hortigranjeiros – CONAB (2022) .....                                                                                 | 71  |
| Figura 25 - | Mapa Geral do CEASA/PE – Recife.....                                                                                                                                      | 75  |
| Figura 26 - | Etapas envolvidas no processo de composição gravimétrica dos RSU...                                                                                                       | 76  |
| Figura 27 - | Procedimento de quarteamento dos resíduos.....                                                                                                                            | 77  |
| Figura 28 - | Etapas desenvolvidas para a realização da composição gravimétrica dos resíduos de frutas e verduras do CEASA/PE – Recife.....                                             | 77  |
| Figura 29 - | Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira.....                                                                                                                         | 78  |
| Figura 30-  | Biorreatores com diferentes inóculos e substratos em temperatura ambiente.....                                                                                            | 79  |
| Figura 31 - | Fluxograma das etapas do ensaio BMP.....                                                                                                                                  | 80  |
| Figura 32 - | Ensaio do teor de umidade dos resíduos de frutas e verduras provenientes do CEASA/PE – Recife.....                                                                        | 86  |
| Figura 33 - | Fluxograma do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE – Recife.....                                                                                        | 89  |
| Figura 34 - | Sistema de biodigestão anaeróbia em escala piloto instalado no CEASA/PE - Recife utilizado na pesquisa (fotos após a instalação) .....                                    | 90  |
| Figura 35 - | Vista geral do sistema de biodigestão de resíduos orgânicos do CEASA/PE – Recife.....                                                                                     | 93  |
| Figura 36 - | Etapas para a partida do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE – Recife.....                                                                             | 94  |
| Figura 37 - | Analisador de biogás Dräger modelo X-am 7.000.....                                                                                                                        | 97  |
| Figura 38 - | Composição Gravimétrica média dos resíduos do CEASA/PE – Recife nos galpões em estudo entre os anos de 2019 e 2020.....                                                   | 102 |
| Figura 39 - | Correlação entre a composição gravimétrica média e a frequência de aparecimento dos resíduos do CEASA/PE – Recife nos galpões em estudo entre os anos de 2019 e 2020..... | 105 |
| Figura 40 - | Análise de Cluster a partir da caracterização química dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife.....   | 107 |
| Figura 41 - | Teor de umidade dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife.....                                         | 109 |

|             |                                                                                                                                                                                        |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 42 - | Teor de sólidos voláteis dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife.....                                             | 110 |
| Figura 43 - | Comparativo entre os percentuais de Lignina, Celulose e Hemicelulose dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife..... | 112 |
| Figura 44 - | Fator de biodegradabilidade dos resíduos de beringela, tomate, laranja, folhosos/hortaliças e pimentão.....                                                                            | 113 |
| Figura 45 - | Coeficiente de biodegradação no tempo em aterros.....                                                                                                                                  | 114 |
| Figura 46 - | Curva de volume acumulado de biogás dos diferentes inóculos (LE, RB e LE + RB) .....                                                                                                   | 116 |
| Figura 47 - | Taxa de geração de biogás dos inóculos LE, RB e LE+RB.....                                                                                                                             | 117 |
| Figura 48 - | Comparação do Potencial de Geração de Biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças em termos de NmL/gS e NmL/gSV.....                             | 120 |
| Figura 49 - | Análise de Cluster para o potencial de geração de biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife.....             | 121 |
| Figura 50 - | Análise de Cluster para a taxa de geração de biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife.....                  | 122 |
| Figura 51 - | Comportamento da Taxa de Geração de Biogás.....                                                                                                                                        | 123 |
| Figura 52 - | Avaliação do pH inicial e final dos ensaios de BMP.....                                                                                                                                | 125 |
| Figura 53 - | Comparação do comportamento do potencial de geração de biogás em diferentes modelos cinéticos para as configurações em estudo.....                                                     | 128 |
| Figura 54 - | Diferentes fases do processo do sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE – Recife.....                                                                  | 131 |
| Figura 55 - | Preenchimento do sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE – Recife.....                                                                                 | 135 |
| Figura 56 - | Composição geral dos resíduos de frutas e verduras inseridos no biodigestor anaeróbio no período de estudo.....                                                                        | 136 |
| Figura 57 - | Comparação dos resíduos utilizados no preenchimento do sistema de biodigestão anaeróbia durante o período de estudo.....                                                               | 137 |

|             |                                                                                                                                                                     |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 58 - | Comportamento da variação temporal do pH nos reatores R1, R2 e R3.....                                                                                              | 139 |
| Figura 59 - | Comportamento da variação temporal da DQO nos reatores R1, R2 e R3.....                                                                                             | 140 |
| Figura 60 - | Comportamento da variação temporal do volume acumulado e da taxa de geração de biogás no R3.....                                                                    | 141 |
| Figura 61 - | Comportamento da Carga Orgânica Volumétrica e da Produção mensal de Biogás no sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE – Recife..... | 142 |
| Figura 62 - | Comportamentos das variações temporais das porcentagens de gás metano, dióxido de carbono e oxigênio no R3.....                                                     | 143 |
| Figura 63 - | Comportamento do pH, volume, taxa e composição de biogás nas diferentes fases do processo.....                                                                      | 144 |

## LISTA DE QUADROS

|            |                                                                                           |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - | Processos de tratamento e purificação do biogás.....                                      | 41 |
| Quadro 2 - | Comparação das tecnologias de tratamento de resíduos visando à<br>produção de biogás..... | 52 |
| Quadro 3 - | Siglas e diferentes configurações utilizadas para os ensaios de BMP.....                  | 81 |
| Quadro 4 - | Parâmetros referentes à caracterização química das amostras.....                          | 85 |
| Quadro 5 - | Parâmetros referentes à caracterização físico-química do digestato.....                   | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                                                            |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 -  | Composição do biogás para diferentes tipos de resíduos orgânicos.....                                                                                      | 36  |
| Tabela 2 -  | Diferentes condições de operação observados em estudos sobre digestão anaeróbia.....                                                                       | 38  |
| Tabela 3 -  | Propriedades do metano e do dióxido de carbono.....                                                                                                        | 39  |
| Tabela 4 -  | Resumo dos principais parâmetros utilizados em biodigestores em escala intermediária segundo a literatura.....                                             | 61  |
| Tabela 5 -  | Composição média expressa em termos de porcentagem de sólidos totais.....                                                                                  | 67  |
| Tabela 6 -  | Etapas e atividades do estudo.....                                                                                                                         | 72  |
| Tabela 7 -  | Dados gerais da infraestrutura física e operacional do CEASA/PE – Recife.....                                                                              | 74  |
| Tabela 8 -  | Diferentes configurações utilizadas para os ensaios de BMP.....                                                                                            | 81  |
| Tabela 9 -  | Principais parâmetros utilizados como base de cálculo no projeto do sistema de biodigestão em escala piloto instalado no CEASA/PE – Recife.....            | 88  |
| Tabela 10 - | Parâmetros operacionais do sistema de biodigestão em escala experimental instalado no CEASA/PE – Recife.....                                               | 96  |
| Tabela 11 - | Faixa de medição do Dräger X-am 7.000.....                                                                                                                 | 98  |
| Tabela 12 - | Diferentes tipos de resíduos encontrados durante a composição gravimétrica média do CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2021.....                    | 100 |
| Tabela 13 - | Frequência de aparecimento dos diferentes resíduos de frutas e verduras descartados no CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2021.....                 | 103 |
| Tabela 14 - | Resultados da caracterização dos resíduos de frutas e verduras do CEASA/PE - Recife com maior frequência de aparecimento entre os anos de 2020 e 2021..... | 106 |
| Tabela 15 - | Resultados das caracterizações iniciais do lodo de ETE e do rúmen bovino.....                                                                              | 115 |
| Tabela 16 - | Comparação dos resultados de volume máximo acumulado nas diferentes configurações de substrato+inóculo.....                                                | 118 |

|             |                                                                                                                                                                                                |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 17 - | Parâmetros cinéticos e estatísticos dos modelos para as diferentes configurações em estudo.....                                                                                                | 129 |
| Tabela 18 - | Fase, ocorrência e comportamento dos parâmetros analisados no sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2022.....                                          | 133 |
| Tabela 19 - | Variação temporal da umidade e dos sólidos voláteis nos reatores R1, R2 e R3 entre os anos de 2021 e 2022.....                                                                                 | 139 |
| Tabela 20 - | Valores médios do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE - Recife em termos de concentração da série de sólidos, DQO e eficiência na remoção entre os anos de 2021 e 2022..... | 145 |
| Tabela 21 - | Massa de DQO obtida entre os anos de 2021 e 2022 no sistema de biodigestão anaeróbia instalada no CEASA/PE-Recife.....                                                                         | 146 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                 |                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| ABRELPE         | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| AGV             | Ácidos graxos voláteis                                                    |
| AMPTS           | <i>Automatic Methane Potential Test System</i>                            |
| ANEEL           | Agência Nacional de Energia Elétrica                                      |
| ANP             | Agência Nacional do Petróleo                                              |
| AT              | Alcalinidade Total                                                        |
| BJL + LE        | Berinjela + Lodo de ETE                                                   |
| BJL + RB        | Berinjela + Rúmen Bovino                                                  |
| BJL LE+RB       | Berinjela + Lodo de ETE + Rúmen Bovino                                    |
| BMP             | <i>Biochemical Methane Potential</i>                                      |
| CEAGESP         | Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo                  |
| CEASAS          | Centrais de Abastecimentos                                                |
| CIBIOGAS        | Centro Internacional de Energias Renováveis                               |
| CH <sub>4</sub> | Gás metano                                                                |
| C/N             | Relação carbono nitrogênio                                                |
| CNTP            | Condições Normais de Temperatura e Pressão                                |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono                                                        |
| CONAB           | Companhia Nacional de Abastecimento                                       |
| COV             | Carga Orgânica Volumétrica                                                |
| CTR             | Central de Tratamento de Resíduos                                         |
| DA              | Digestão Anaeróbia                                                        |
| DQO             | Demanda Química de Oxigênio                                               |
| ETE             | Estação de Tratamento de Esgotos                                          |
| ETR             | Estação de Tratamento de Resíduos                                         |
| FAO             | Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura              |
| FINEP           | Financiadora de Estudos e Projetos                                        |
| FLS LE          | Folhosos + Lodo de ETE                                                    |
| FLS RB          | Folhosos + Rúmen Bovino                                                   |
| FLS LE+RB       | Folhosos + Lodo de ETE + Rúmen Bovino                                     |

|                  |                                           |
|------------------|-------------------------------------------|
| GEE              | Gases de Efeito Estufa                    |
| GRS              | Grupo de Resíduos Sólidos                 |
| H <sub>2</sub>   | Hidrogênio                                |
| H <sub>2</sub> S | Sulfeto de Hidrogênio                     |
| LAR + LE         | Laranja + Lodo de ETE                     |
| LAR + RB         | Laranja + Rúmen Bovino                    |
| LAR LE+RB        | Laranja + Lodo de ETE + Rúmen Bovino      |
| LE               | Lodo Esgoto                               |
| LE + RB          | Lodo de ETE + Rúmen Bovino                |
| LP1              | Livre Produtor 1                          |
| LP2              | Livre Produtor 2                          |
| LP3              | Livre Produtor 3                          |
| NBR              | Normas Técnicas Brasileiras               |
| NaOH             | Hidróxido de Sódio                        |
| pH               | Potencial Hidrogeniônico                  |
| PMT + LE         | Pimentão + Lodo de ETE                    |
| PMT + RB         | Pimentão + Rúmen Bovino                   |
| PMT LE+RB        | Pimentão + Lodo de ETE + Rúmen Bovino     |
| PNRS             | Política Nacional de Resíduos Sólidos     |
| PRONAF           | Programa Nacional de Agricultura Familiar |
| R1               | Reator 1                                  |
| R2               | Reator 2                                  |
| R3               | Reator 3                                  |
| RB               | Rúmen Bovino                              |
| RAFA             | Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente      |
| RSU              | Resíduos Sólidos Urbanos                  |
| RU               | Restaurante Universitário                 |
| ST               | Sólidos Totais                            |
| SV               | Sólidos Voláteis                          |
| TOM + LE         | Tomate + Lodo de ETE                      |
| TOM + RB         | Tomate + Rúmen Bovino                     |
| TOM              | Tomate + Lodo de ETE + Rúmen Bovino       |
| LE+RB            |                                           |

|      |                                        |
|------|----------------------------------------|
| TRH  | Tempo de Retenção Hidráulica           |
| UASB | <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais   |
| UFPE | Universidade Federal de Pernambuco     |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                  | <b>22</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                                                                          | 23        |
| 1.1.1    | <b>Objetivo Geral.....</b>                                                                               | <b>23</b> |
| 1.1.2    | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                                                       | <b>24</b> |
| 1.2      | ESTRUTURA DA TESE .....                                                                                  | 24        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                                        | <b>26</b> |
| 2.1      | RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA BIOMASSA DE ALTO POTENCIAL<br>ENERGÉTICO .....                                   | 26        |
| 2.2      | CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A DIGESTÃO ANAERÓBIA.....                                                     | 30        |
| 2.2.1    | <b>Diferentes parâmetros que influenciam no processo de biodegradação<br/>anaeróbia .....</b>            | <b>33</b> |
| 2.2.2    | <b>Características Gerais, Tratamento e Aplicações do Biogás .....</b>                                   | <b>38</b> |
| 2.2.3    | <b>Características Gerais, Tratamento e Aplicações do Digestato.....</b>                                 | <b>43</b> |
| 2.3      | PRODUÇÃO MUNDIAL DE BIOGÁS E BIOMETANO .....                                                             | 45        |
| 2.4      | TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DE<br>BIOGÁS .....                                      | 48        |
| 2.4.1    | <b>Classificação com base na quantidade de sólidos totais do substrato .....</b>                         | <b>51</b> |
| 2.4.2    | <b>Classificação com base no regime de alimentação .....</b>                                             | <b>53</b> |
| 2.4.3    | <b>Classificação com base no número de estágios.....</b>                                                 | <b>53</b> |
| 2.5      | AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E METANO EM BIODIGETORES<br>ANAERÓBIOS DE DIFERENTES ESCALAS .....        | 55        |
| 2.5.1    | <b>Biodigestores Anaeróbios em Escala de Laboratório – Potencial Bioquímico do<br/>Metano (BMP).....</b> | <b>56</b> |
| 2.5.2    | <b>Biodigestores Anaeróbios em Escala Intermediária .....</b>                                            | <b>57</b> |
| 2.5.3    | <b>Biodigestores Anaeróbios em Escala de Campo .....</b>                                                 | <b>62</b> |
| 2.6      | BALANÇO DE MASSA .....                                                                                   | 66        |
| 2.7      | PANORAMA DA GESTAO DE RESÍDUOS DE CEASAS NO BRASIL .....                                                 | 68        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                          | <b>72</b> |
| 3.1      | GESTÃO DOS RESÍDUOS DO CEASA/PE – RECIFE .....                                                           | 73        |
| 3.1.1    | <b>Área de estudo e mapeamento da quantidade de resíduos descartados.....</b>                            | <b>73</b> |
| 3.2      | COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO<br>CEASA/PE – RECIFE .....                             | 75        |

|       |                                                                                                                                   |            |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3   | ENSAIOS ANALÍTICOS PARA AVALIAÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CEASA/PE – RECIFE .....                              | 78         |
| 3.3.1 | <b>Detalhamento do Ensaio de BMP – Configuração Tradicional .....</b>                                                             | <b>79</b>  |
| 3.3.2 | <b>Cálculo do Volume do Biogás Gerado.....</b>                                                                                    | <b>82</b>  |
| 3.3.3 | <b>Ajustes de curvas de degradação .....</b>                                                                                      | <b>83</b>  |
| 3.3.4 | <b>Análise Estatística .....</b>                                                                                                  | <b>84</b>  |
| 3.3.5 | <b>Ensaio Analítico .....</b>                                                                                                     | <b>84</b>  |
| 3.4   | ESTUDO DOS BIODIGESTORES ANAERÓBIOS EM ESCALA PILOTO: PROJETO E IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO CEASA/PE ..... | 86         |
| 3.4.1 | <b>Planejamento do Biodigestor em Escala Piloto .....</b>                                                                         | <b>87</b>  |
| 3.4.2 | <b>Componentes do Biodigestor em Escala Piloto .....</b>                                                                          | <b>89</b>  |
| 3.4.3 | <b>Partida, operação e monitoramento do sistema de biodigestão anaeróbia .....</b>                                                | <b>94</b>  |
| 4     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                               | <b>99</b>  |
| 4.1   | COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS DO CEASA/PE - RECIFE .....                                                                   | 99         |
| 4.1.1 | <b>Frequência de Aparecimento e Composição Gravimétrica .....</b>                                                                 | <b>102</b> |
| 4.1.2 | <b>Caracterização dos resíduos de frutas e verduras com maior frequência de aparecimento .....</b>                                | <b>106</b> |
| 4.2   | PH, TEOR DE UMIDADE E TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE - RECIFE .....          | 107        |
| 4.3   | RESULTADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE - RECIFE.....                          | 110        |
| 4.4   | TEOR DE FIBRAS E GRAU DE BIODEGRADABILIDADE DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE – RECIFE ....              | 112        |
| 4.5   | CARACTERIZAÇÃO DOS INÓCULOS: LODO DE ETE E RÚMEN BOVINO .....                                                                     | 114        |
| 4.6   | AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA ATRAVÉS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BMP .....                                                   | 116        |
| 4.6.1 | <b>Resultados de Volume Acumulado e Taxa de Geração de Biogás dos inóculos.....</b>                                               | <b>116</b> |
| 4.6.2 | <b>Resultados de Volume Acumulado de Biogás do substrato+inóculo.....</b>                                                         | <b>118</b> |

|         |                                                                                                                                             |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6.3   | Potencial de produção de biogás dos resíduos de frutas e verduras provenientes do CEASA/PE – Recife .....                                   | 119 |
| 4.6.4   | Comportamento da Taxa Média de geração de biogás.....                                                                                       | 121 |
| 4.6.5   | Avaliação do pH inicial e final dos ensaios de BMP .....                                                                                    | 123 |
| 4.6.6   | Avaliação do Potencial Máximo de Geração de Biogás através de Modelos Cinéticos .....                                                       | 126 |
| 4.7     | SISTEMA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DO CEASA/PE - RECIFE .....                                                                                    | 131 |
| 4.7.1   | Preenchimento da planta de biodigestão anaeróbia .....                                                                                      | 135 |
| 4.7.2   | Avaliação do monitoramento dos parâmetros ambientais no biodigestor .....                                                                   | 137 |
| 4.7.2.1 | Comportamento do pH no sistema de biodigestão anaeróbia .....                                                                               | 137 |
| 4.7.2.2 | Comportamento dos percentuais de umidade e sólidos voláteis no sistema de biodigestão anaeróbia .....                                       | 139 |
| 4.7.2.3 | Comportamento da variação temporal da DQO no sistema de biodigestão anaeróbia.....                                                          | 140 |
| 4.7.2.4 | Volume acumulado e Taxa de Geração de Biogás do sistema de biodigestão anaeróbia.....                                                       | 141 |
| 4.7.2.5 | Composição do Biogás conferido ao sistema de biodigestão anaeróbia .....                                                                    | 142 |
| 4.8     | BALANÇO DE MASSA .....                                                                                                                      | 145 |
| 6       | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                                                                  | 147 |
| 6.1     | CONCLUSÕES .....                                                                                                                            | 147 |
| 6.2     | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....                                                                                                      | 149 |
|         | REFERÊNCIAS .....                                                                                                                           | 150 |
|         | APÊNDICE A – RESULTADOS MENSIS DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS NOS GALPÕES LP1, LP2, LP3 E PRONAF ENTRE OS ANOS DE 2020 E 2021..... | 170 |

## 1 INTRODUÇÃO

A comercialização de produtos hortifrutigranjeiros como frutas, verduras e hortaliças geram grandes quantidades de resíduos, principalmente em mercados atacadistas, que possuem suas atividades voltadas à comercialização destes. Segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (2021), cerca de um terço dos alimentos produzidos para consumo humano são perdidos ou desperdiçados no mundo. Isto equivale à 1.300 milhões de toneladas por ano, sendo 127 milhões apenas na América Latina.

Um estudo de composição gravimétrica realizado pela ABRELPE (2020) apresentou que, no Brasil, a matéria orgânica é a fração predominante, com participação de 45,3% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados. Este percentual indica uma quantidade descartada de mais de 36 milhões de toneladas de resíduos orgânicos no ano de 2020.

A indústria agroalimentar apresenta-se como um dos pilares fundamentais da economia mundial, visto estar intimamente direcionado ao crescimento econômico e social. Esta atividade provoca uma grande quantidade de resíduos orgânicos descartados, que quando não tratados corretamente poderá ocasionar em diversos problemas, sejam eles de cunho econômico, político, social e ambiental (MORALES-POLO *et al.*, 2019).

Segundo Soares; Freire *et al.* (2018), pesquisas realizadas pela Embrapa Agroindústria de Alimentos indicaram que as perdas, com relação a frutas e hortaliças chegam a atingir em média 30% e 35%, respectivamente. Essas perdas podem ser causadas em virtude de uma diversidade de fatores tais como patogênicos, fisiológicos, físicos, por manuseio, transporte e armazenamento incorreto, proporcionando assim uma elevação nos preços de vendas dos produtos (SANTOS; SILVA, 2010; SOARES; FREIRE, 2018). Frutas e vegetais são rapidamente degradados por micro-organismos e quando estão muito maduros ou danificados, essa degradação ocorre num ritmo ainda maior, podendo gerar maiores custos operacionais dos mercados devido a perdas de vendas (SCANO *et al.*, 2014).

O atual sistema de destinação final de RSU no Brasil ainda é o aterro sanitário. Contudo, segundo Masebinu *et al.* (2018), à medida que a taxa de geração de RSU aumenta, pode-se esperar que a projeção da vida útil dos aterros sanitários pode ser afetada, sugerindo a necessidade de considerar outras opções para o descarte. Assim, tendo em vista que no Brasil, um elevado percentual dos RSU gerados são de materiais orgânicos e passíveis de biodegradação anaeróbia ou aeróbia, indica-se o tratamento por meio de tecnologias que possam utilizar de forma satisfatória as potencialidades existentes em cada componente. Segundo Gueri *et al.* (2018), o desperdício de alimentos tem um alto potencial energético que

pode ser convertido na forma de biometano por digestão anaeróbia. Arelli *et al.* (2021) afirmam que a tecnologia da digestão anaeróbia é considerada promissora para tratar de forma sustentável resíduos orgânicos, através da transformação em biogás (25–50% CO<sub>2</sub> e 50–70% CH<sub>4</sub>) para geração de bioenergia.

Os projetos de reatores comumente vistos para sistemas anaeróbios são em geral do tipo monofásicos, onde as reações de hidrólise, acetogênese e metanogênese ocorrem simultaneamente em um único reator. Porém, o alto teor orgânico biodegradável dos resíduos de frutas e verduras, e a dificuldade na conversão da biomassa lignocelulósica dificulta o tratamento em um sistema monofásico, tendo em vista a rápida acidificação, que resulta na inibição da atividade metanogênica (GANESH *et al.*, 2014; MASEBINU *et al.*, 2018).

Desta forma, a utilização de digestores de dois estágios pode contribuir com o aumento da eficiência do processo, visto que no primeiro estágio tem-se a vantagem de hidrolisar o substrato e atuar no tamponamento da carga orgânica. Assim, na segunda etapa, o substrato hidrolisado e homogeneizado pode ser facilmente digerido pelos micro-organismos responsáveis pela formação de metano, as bactérias metanogênicas (MASEBINU *et al.*, 2018).

Diante do exposto, a pesquisa objetiva analisar a geração de biogás e metano proveniente da digestão anaeróbia dos resíduos da comercialização de frutas e verduras do CEASA/PE - Recife, através de ensaios laboratoriais, considerando diferentes configurações de codigestão, e da operação de uma planta experimental em escala piloto, em condições controladas, visando à produção de biogás.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente subtópico apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste estudo.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica da aplicação da tecnologia da digestão anaeróbia no tratamento dos resíduos de frutas e verduras do CEASA/PE – Recife.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para que seja atingido o objetivo supracitado, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um mapeamento da quantidade e composição gravimétrica de resíduos orgânicos gerados nos quatro principais galpões de comercialização de frutas e verduras no CEASA/PE – Recife;
- b) Analisar as características físico-químicas dos resíduos com maior frequência de aparecimento na composição gravimétrica dos quatro principais galpões de comercialização de frutas e verduras dispostos no CEASA/PE – Recife;
- c) Estudar a variação do potencial de geração de biogás, a taxa de geração e a cinética de degradação dos resíduos com maior frequência de aparecimento nos galpões do CEASA/PE - Recife por meio de ensaios em escala de bancada (ensaio de determinação do Potencial Bioquímico de Metano);
- d) Avaliar, através do uso de Análise Multivariada a similaridade dos resíduos em termos de características físico-químicas, potencial de geração de biogás (NmL/gS) e taxa de geração de biogás (NmL/dia)
- e) Planejar, implantar, operar e monitorar um sistema de biodigestão anaeróbia em escala piloto, adotando a co-digestão com de resíduos de frutas e verduras com lodo de estação de tratamento de esgoto e rúmen bovino.

## 1.2 ESTRUTURA DA TESE

A presente Tese está subdividida com a seguinte estrutura:

A Introdução abordou as considerações iniciais que fundamentaram e estabeleceram os objetivos da tese, com ênfase para a fração orgânica dos resíduos e o tratamento através da digestão anaeróbia. Os objetivos gerais e específicos do estudo estão também descritos na referida seção.

A Revisão da Literatura apresenta os fundamentos da digestão anaeróbia, os fatores intervenientes do processo e a produção mundial de biogás. Além disso, a seção apresenta diferentes experimentos em escala de laboratório, intermediária e de campo para o avaliar a produção de biogás e um panorama da gestão de resíduos nas Centrais de Abastecimento no Brasil.

Sequencialmente foram apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da Tese desde a coleta, os materiais e sua caracterização, métodos analíticos, procedimentos experimentais até o tratamento dos dados obtidos nos experimentos com reatores anaeróbios de escala de laboratório (BMPs) e o sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE – Recife.

Na seção de Resultados e Discussão, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente é apresentada a caracterização físico-química e a correlação através de Análise Multivariada dos cinco resíduos de frutas e verduras mais representativos no CEASA/PE - Recife. Em seguida, apresenta-se a estimativa geral da produção de biogás desses resíduos através de ensaios de BMP bem como a cinética de produção de biogás, através de cinco diferentes modelos matemáticos. Por fim, são apresentados os dados do sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE – Recife.

Ao final, são apresentadas as conclusões do trabalho, e também, sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

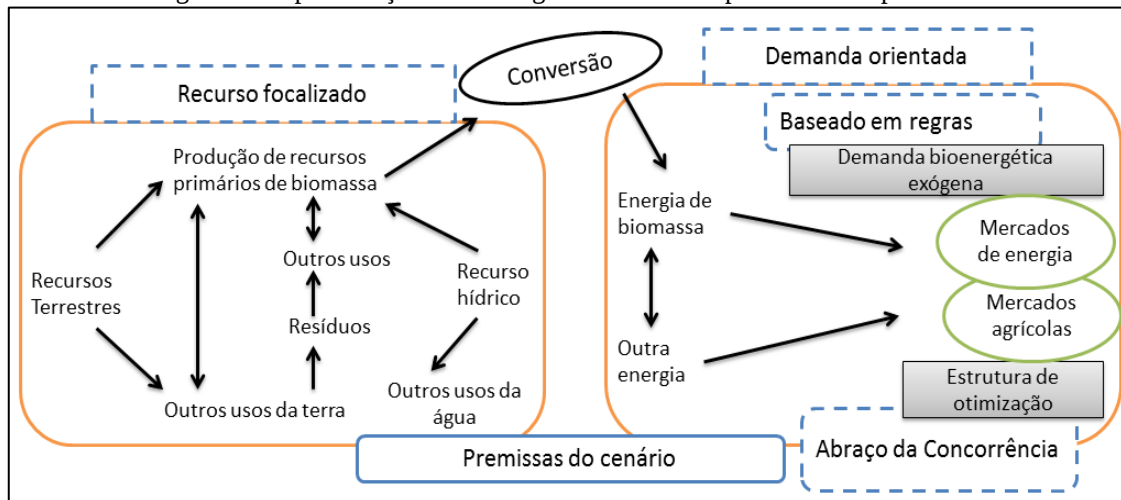
O presente tópico apresenta a revisão de literatura do estudo com enfoque aos resíduos orgânicos, tecnologia da digestão anaeróbia, produção mundial de biogás e biometano, avaliação da geração de biogás em biodigestores anaeróbios de diferentes escalas, balanço de massa e panorama da gestão dos resíduos em Centrais de Abastecimento e Logística no Brasil.

### 2.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS: UMA BIOMASSA DE ALTO POTENCIAL ENERGÉTICO

O crescimento populacional tem impulsionado uma demanda cada vez maior por alimentos e consumo de energia, tornando assim essas questões fundamentais para o desenvolvimento de estudos e ações no âmbito político, econômico e social. Os gases de efeito estufa gerados a partir de combustíveis fósseis se acumulam continuamente na atmosfera, impactando diretamente na poluição do ar e nas alterações climáticas. Desta forma, a utilização de forma correta da biomassa e da bioenergia podem ser atributos que contribuam na redução de forma significativa no que tange as emissões de gases com efeito de estufa (LONG *et al.*, 2013).

Singh *et al.* (2014) afirmam que a biomassa é provavelmente nossa mais antiga fonte de energia depois do sol, além de ser considerada uma fonte renovável tendo em vista a sua oferta ilimitada de produtos. Segundo ANEEL (2002), no âmbito energético, a biomassa é todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia, para uso térmico industrial, geração de eletricidade e/ou transformada em outras formas de energias sólidas como carvão vegetal e briquetes, líquidas como o etanol ou o biodiesel, e gasosa como o biogás proveniente da decomposição de RSU (SEABRA JR, 2017). Batidzirai *et al.*, (2012) afirmam que a biomassa pode ser classificada de acordo com a demanda ou o recurso, conforme apresentado na Figura 1.

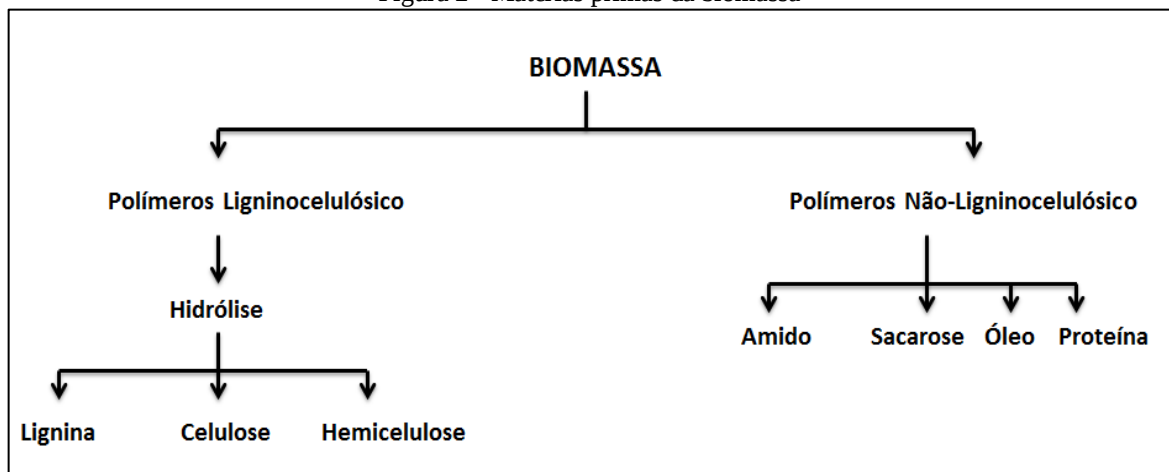
Figura 1 - Representação de abordagens da biomassa por recursos e por demanda



Fonte: Adaptado de Batidzirai *et al.* (2012).

No que concerne à composição química da biomassa, Doelle (2013) afirma que esta varia entre as espécies, mas, em geral é constituída de 25% de lignina e 75% de carboidrato, sendo este, constituído de moléculas monoméricas de açúcares, ligadas em cadeias poliméricas, onde a celulose, hemicelulose e o amido são os mais significativos. A Figura 2 apresenta as matérias-primas provenientes da biomassa.

Figura 2 - Matérias primas da biomassa



Fonte: Adaptado de Doelle (2013)

Como fonte energética, Wefle (2017) afirma que a energia da biomassa contribui atualmente com aproximadamente 10% do fornecimento global, onde dois terços dessa bioenergia são gerados em países em desenvolvimento e o restante no mundo industrializado. Segundo Long *et al.* (2013), a bioenergia – produção baseada em recursos de biomassa – apresenta-se como um substituto essencial para a energia fóssil e tem atraído a atenção geral,

visto que contribui com cerca de 9 a 13% do total global no que se refere ao fornecimento de energia.

No Brasil, a biomassa ainda apresenta uma reduzida participação como contribuição na matriz energética do país, visto que segundo a ANEEL (2022), os empreendimentos atuais em operação, responsáveis pela geração e abastecimento de energia elétrica no Brasil, representam cerca de 185,5 GW de potência outorgada, sendo que 9,02% destes são relacionados à energia proveniente do aproveitamento energético da biomassa, o que representa 16,7 GW.

Apesar das grandes usinas hidrelétricas serem as principais geradoras de eletricidade no Brasil, estas causam grandes impactos ambientais e sociais, o que alertam sobre a necessidade da expansão da produção de energia elétrica de menores impactos ambientais, tais como as provenientes da biomassa, que, a depender da tecnologia de tratamento, poderá ter um custo operacional e de construção bem menor quando comparado às hidrelétricas (REGO; HERNANDES, 2006; WWF, 2012;).

Dentre as diversas fontes de biomassa que, através de tecnologias de tratamento podem viabilizar o potencial energético, observa-se a presença dos resíduos orgânicos. Estes resíduos possuem características particulares, sendo em geral classificados como do tipo lignocelulósicos, apresentam-se como abundantes fontes de biomassa e em geral são geradas em grandes quantidades através de atividades agrícolas, florestais, municipais e agroindustriais (SANTOS, 2019; PAUDEL *et al.*, 2017).

Segundo a FAO (2021), entre os anos 2000 e 2019 a produção mundial de frutas aumentou 54%, atingindo 883 milhões de toneladas por ano, com a maior representatividade atribuída a frutas do tipo banana, melancia, maçã, laranja e uva. Já a produção de vegetais/hortaliças apresentou um aumento de 65%, passando de 446 milhões de toneladas no ano 2000 para 1.128 milhões de toneladas no ano de 2019, onde as espécies do tipo tomate, cebolas, pepinos, berinjela e repolho apresentaram um percentual variando entre 42% e 45% do total.

A Ásia é a maior fonte de vegetais/hortaliças e frutas, respondendo por 77,96% e 58% do total da produção mundial respectivamente. China, Brasil, Índia, Estados Unidos e México respondem por quase 50,1% da oferta mundial de frutas, sendo os cinco principais países produtores em ordem decrescente. Já em termos de hortaliças, China, Índia, Estados Unidos, Turquia e Vietnã apresentam-se como os maiores produtores mundialmente, respondendo por uma oferta de 70,5% do total (FAO, 2021).

Ressalta-se que, no que concerne ao tratamento desses resíduos, grande parte são aterrados, ou reutilizados como composto. Porém, tendo em vista que este material desperdiçado contém um alto teor de umidade sugere-se a digestão anaeróbia como método de tratamento visando o aproveitamento energético (ZHANG *et al.*, 2007).

Algumas iniciativas visando desviar resíduos orgânicos para aterros são observadas. Destaca-se que, em janeiro de 2022, uma Lei Estadual da Califórnia (SB 1383) entrou em vigor com o intuito de ajudar a reduzir ainda mais as emissões de gases de efeito estufa. Para tanto, cidades e condados devem fornecer coleta de resíduos orgânicos a todos os residentes e empresas. Ainda de acordo com esta lei, todos os californianos, seja empresa ou pessoa física, deverão separar todos os resíduos orgânicos dos demais lixos. Esses resíduos deverão ser direcionados para processos de compostagem ou da digestão anaeróbia, não podendo ser destinados para aterros sanitários.

Segundo Ferreira (2015), a geração de resíduos tem impacto direto sobre o tratamento e a disposição final dos mesmos, o que alerta sobre a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias, com baixa emissão de carbono e visando prioritariamente o aproveitamento energético. Apenas após a inserção de novos instrumentos de política serem introduzidos no que concerne à gestão de resíduos, implementados a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305/2010, ainda se faz necessárias maiores medidas que além de destinar, realizem o tratamento adequado, principalmente visando o aproveitamento energético.

Apenas após a inserção de novos instrumentos de política serem introduzidos no que concerne à gestão de resíduos foi que fomentou o direcionamento do tratamento com aproveitamento energético no país. Segundo Jucá *et al.* (2013), a viabilidade econômica relacionada a tecnologia da digestão anaeróbia poderá ser identificada principalmente a partir da redução dos custos de disposição em aterros sanitários, bem como pela possibilidade de comercialização de energia renovável.

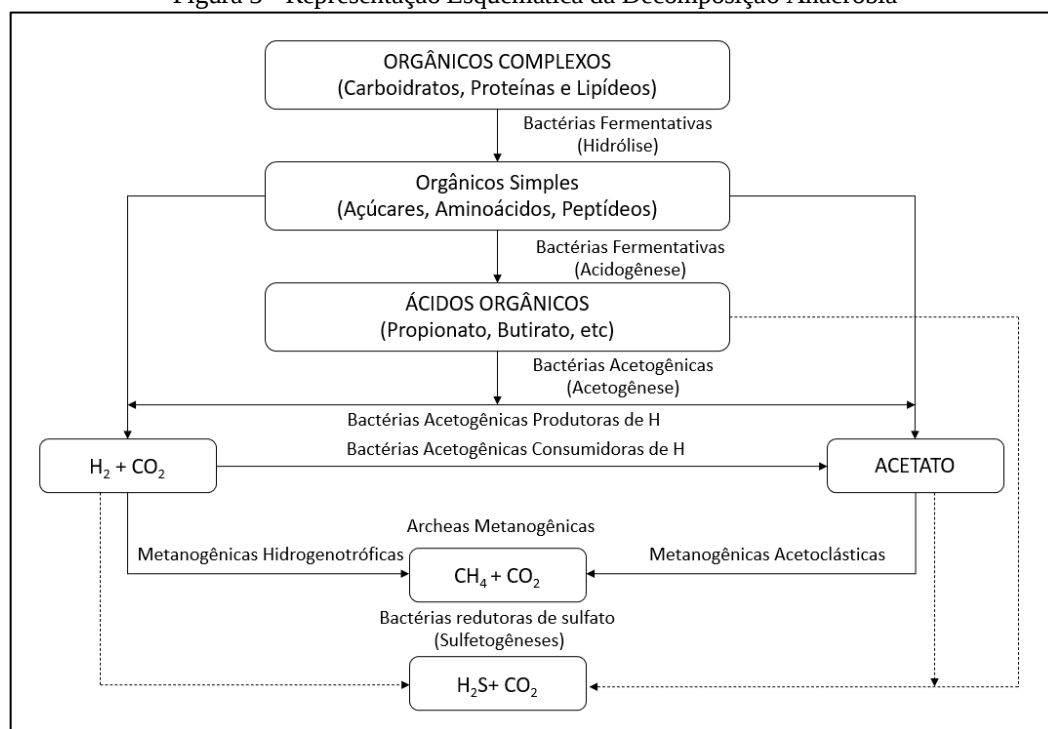
## 2.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A DIGESTÃO ANAERÓBIA

O gerenciamento dos resíduos orgânicos em geral requer a implementação de tratamentos que sejam adequados ao tipo de resíduo, envolvendo em especial a reciclagem dos materiais, transformando-os em produtos com valor agregado (VARNERO, 2011). Os custos dos fertilizantes químicos, a necessidade de descontaminação e mitigação de aterros controlados e lixões, principalmente no Brasil e a eliminação de resíduos fortaleceram a necessidade de alternativas energéticas de tratamento e quando possível realizando a valorização dos mesmos.

A digestão anaeróbia (DA) é um processo bioquímico do carbono que converte matéria orgânica, através da ação de micro-organismos naturais, em condições de ausência de oxigênio. Esta degradação de compostos orgânicos, sejam complexos ou não, produz uma mistura gasosa composta de metano, dióxido de carbono e traços de outros gases, conhecido como biogás, constituído principalmente por metano (55-70%), dióxido de carbono (30-45%); e gás sulfídrico (200 a 35.000 ppmV), (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; CHERNICHARO, 2007; BOTHEJU *et al.*, 2011; FERREIRA, 2015). Segundo Zamri *et al.* (2021), a digestão anaeróbia tem recebido considerável atenção devido à sua recuperação significativa de energia e nutrientes, bem como seu potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE).

Este processo biológico envolve o tratamento e estabilização de matéria orgânica na ausência de oxigênio realizado por um consórcio de micro-organismos e ocorre através de quatro estágios bioquímicos fundamentais: hidrólise (transformação de compostos orgânicos complexos em componentes orgânicos simples), acidogênese (formação de ácidos), acetogênese (formação de acetato) e metanogênese (formação de metano). Após o consumo do material biodegradável, dá-se início a maturação, onde ocorre a diminuição da produção de metano (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; CHERNICHARO, 1997, ALVES, 2016; NARTKER *et al.*, 2014; VALENÇA, 2017; ZAMRI *et al.* 2021). A Figura 3 apresenta o esquema geral da digestão anaeróbia.

Figura 3 - Representação Esquemática da Decomposição Anaeróbia



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 1993.

Na primeira etapa, comumente conhecida como hidrólise, polímeros orgânicos insolúveis, como amidos, celulose, proteínas e gorduras são degradados ou convertidos em componentes solúveis simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos (CHERNICHARO, 1997; TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993; CHRISTY *et al.*, 2014; ADEKUNLE; OKOLIE, 2015; ALVES, 2016). Este primeiro estágio é de grande importância tendo em vista que as moléculas orgânicas grandes, em virtude do seu tamanho, são de difícil absorção e usadas pelos micro-organismos como fonte de alimento. Para realizar a biodegradação, alguns micro-organismos secretam diferentes tipos de enzimas, chamadas enzimas extracelulares, que quebram as moléculas maiores. Desta forma, os micro-organismos podem assimilar estas moléculas e utilizá-las como fonte de energia e nutrição (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). Segundo Santos (2019), esta etapa pode ser considerada como limitante do processo de digestão anaeróbia, por ser a mais lenta e por ser dependente de alguns parâmetros, como a composição do substrato e a complexidade estrutural do mesmo.

A segunda fase, conhecida como acidogênese tem como princípio transformar os monômeros produzidos na fase hidrolítica em ácidos orgânicos de cadeia mais curta, tais como ácidos butíricos, ácidos propanóicos, ácido acético, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Normalmente, durante essa fase, açúcares simples, ácidos graxos e aminoácidos são

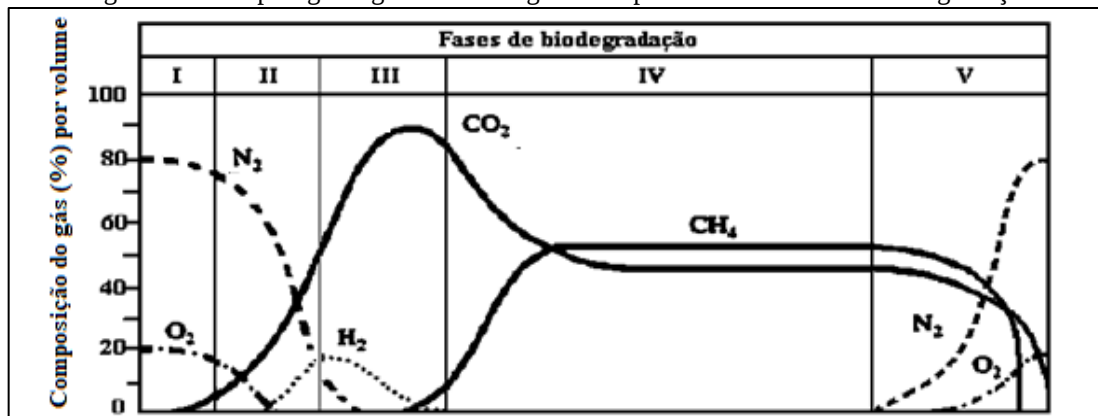
convertidos em ácidos orgânicos e álcoois (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). A acidogênese geralmente é a reação mais rápida na conversão anaeróbia de compostos orgânicos na fase líquida da digestão (CHRISTY *et al.*, 2014).

Sequencialmente, na fase acetogênica, também chamada de fase oxidativa, as bactérias acetogênicas ou produtoras de hidrogênio, convertem os produtos gerados pelas acidogênicas, ou seja, ácidos graxos voláteis (AGV) e álcoois, em substratos como  $H_2$  e  $CO_2$  e em acetato (ALVES, 2016). Segundo Barcelos (2009), os baixos valores de pH favorecem ao aparecimento de maus odores, visto que existe a liberação de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), amônia ( $NH_3$ ) e outros gases.

A fase final ocorre o processo da metanogênese, onde o acetato através das arqueas metanogênicas acetoclásticas, o  $H_2$  e o  $CO_2$  através das hidrogenotróficas, são convertidos em  $CH_4$  e  $CO_2$  (ALVES, 2016). Dentre as principais características desta fase está a elevação do pH, a diminuição da DQO e de AGV's, além de valores de metano maiores que 50% (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Em todo o processo da digestão anaeróbia esta fase apresenta-se como um passo crítico, tendo em vista ser a reação bioquímica mais lenta do processo (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015).

Ressalta-se a existência de uma relação de interdependência entre as diferentes fases, uma vez que cada uma delas requer os produtos da etapa anterior para viabilizar a formação adequada do gás (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; CHERNICHARO, 1997). A Figura 4 apresenta uma análise dos principais gases gerados ao longo das fases de degradação, bem como o tempo médio de duração das mesmas.

Figura 4 - Principais gases gerados ao longo do tempo nas diferentes fases da degradação



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (1993); Alcântara (2007).

\*Legenda: Fase I: Hidrólise; Fase II: Acidogênese; Fase III: Acetogênese; Fase IV: Metanogênese; Fase V: Estabilização

### 2.2.1 Diferentes parâmetros que influenciam no processo de biodegradação anaeróbia

Além das diferentes fases da biodegradação, para uma condição ótima da metanogênese, outros parâmetros podem alterar o desempenho dos processos de digestão anaeróbia. Alguns destes, relacionados às características do material a ser tratado, tais como composição, tamanho da partícula e umidade e outras condições relacionadas ao projeto e operação do reator, como pH, alcalinidade, temperatura, substrato, mistura, relação C:N e tempo de retenção hidráulica (ZHANG *et al.*, 2007; ADEKUNLE; OKOLIE, 2015).

Uma das condições que afetam a taxa de reação é a influência da temperatura, tendo em vista que processos anaeróbios são dependentes do controle da temperatura. Diferentes tipos de bactérias requerem temperaturas diferentes, dependência essa em decorrência do conteúdo de água nas células (SLOPIECKA *et al.*, 2022). Em geral, esses processos apresentam três faixas: (1) Psicrófilo (5–15°C); (2) Mesófilo (35 a 40°C) e (3) Termófilo (50 a 55°C), sendo as faixas mesofílica e termofílica as que fornecem condições ideais para o desenvolvimento da biodegradação (BAJPAI, 2017; SLOPIECKA *et al.*, 2022) porém, mesmo nessas faixas, temperaturas entre 40 e 50°C, podem inibir as bactérias para a produção de metano resultando numa diminuição da produção de biogás (BAJPAI, 2017), sendo a temperatura ótima considerada entre 30 e 35°C com pequenas variações, visto que estudos apontaram que temperaturas mais altas poderiam apresentar uma redução no tempo de retenção exigido (KIM *et al.*, 2006; VERMA, 2002). Grande parte dos digestores anaeróbios em escala industrial operam na faixa mesofílica. É importante ressaltar que, não só os micro-organismos são afetados pela temperatura dentro do reator, como também a cinética da reação (SLOPIECKA *et al.*, 2022).

Em termos de pH, a condição ideal para um processo de digestão anaeróbia é bem estreita, compreendida entre 6,5 e 7,5, com algumas pequenas variações observadas a depender da literatura a ser consultada. Se o número de bactérias acetogênicas exceder o número de bactérias metanogênicas, haverá o declínio do pH, podendo assim inibir a fase metanogênica. Portanto, o pH deve ser mantido na faixa ideal. Não é recomendado valores abaixo de 6,2 (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993; LIU *et al.*, 2015; SLOPIECKA *et al.*, 2022), pois podem indicar uma concentração elevada de AGV's, inibindo a metanogênese (CHENICHARO, 1997; REICHERT, 2005) o que pode vir a causar instabilidade e acidificação nos reatores, com possível desequilíbrio ao sistema (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994; BAJPAI, 2017) e nem mesmo valores acima de 8,0 (LIU *et al.*, 2011; SANTOS, 2019). DEUBLEIN; STEINHAUSER (2008) afirmam que, mesmo se as fases de

hidrólise e acidificação ocorrerem em diferentes reatores, quando se trata de uma usina de biogás de dois estágios, o ajuste deverá ser realizado no segundo estágio.

Desta forma, um dos condicionantes de grande importância para o monitoramento de reatores anaeróbios é a alcalinidade, que visa manter o pH na faixa ideal para o processo de digestão anaeróbia, através da adição de substâncias alcalinizantes, como o carbonato ou o bicarbonato de sódio (REIS, 2012). O efeito tamponante da alcalinidade é benéfico para o processo de digestão anaeróbia, visto evitar elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> e ácidos orgânicos voláteis (SANTOS, 2019). Tchobanoglous *et al.* (1993) e Bajpai (2017) afirmam que as condições estáveis para o sistema de digestão anaeróbia estão na faixa de 1.000 a 5.000mgCaCO<sub>3</sub>/L.

Outra variável de grande relevância para o controle da metanogênese é o teor de água. Em resíduos, o teor de água ocorre em função da decomposição, da temperatura e da coleta (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Ao avaliar o teor de água dos RSU, Leite *et al.* (2009) afirmaram que o percentual é mais representativo em resíduos de restos alimentares e de papel/papelão. Reis (2012) afirma que a quantidade de água no processo apresenta-se como substrato podendo fornecer nutrientes importantes para o desenvolvimento de micro-organismos. Teores de água mínimos podem dificultar o transporte de metabólitos e enzimas, entretanto, elevados percentuais podem ser prejudiciais a metanogênese, visto o acúmulo de AGV's, podendo causar acidificação no reator (ALVES, 2008; SANTOS, 2019).

É importante destacar que, este parâmetro tem relação direta com a quantidade de sólidos voláteis, assim, os tratamentos de digestão anaeróbia, em função do teor de umidade, podem ser classificados segundo o Protegeer (2018) como de via úmida (teor de sólidos voláteis entre 10 e 15% na entrada e 5 a 7% na saída), via seca (não requer água de diluição com teores de sólidos voláteis entre 20-30% na entrada e entre 10-15% na saída) e via extra-seca (sistema mais robusto da atualidade, com teor de sólidos voláteis entre 30-40% na entrada e 15-30% na saída). Os sólidos voláteis são formados pelos componentes orgânicos, sendo um parâmetro de fácil determinação e aborda a fração biodegradável da matéria-prima ou do substrato a ser utilizado (CARITAS, 2008; BAJPAI, 2017).

No que concerne ao tamanho das partículas, o processo de diminuição apresenta-se, a depender do tipo de resíduo, como uma forma de pré-tratamento, visando acelerar principalmente a reação de hidrólise durante a digestão anaeróbia, tendo em vista que o processo pode aumentar a área superficial para acelerar o efeito das enzimas (ALCÂNTARA, 2007; BARCELOS, 2009, SEBOLA *et al.*, 2015; JI *et al.*, 2017). Desta forma, a literatura recomenda a trituração do material.

Apesar de diferentes tipos de substratos que contenham como componentes principais carboidratos, proteínas, gorduras, celulose e hemicelulose poderem ser utilizados para a geração de energia através do processo da digestão anaeróbia, é importante cautela, tendo em vista que o tipo de substrato selecionado poderá ser determinante no que se refere à qualidade e a quantidade do gás gerado. Ressalta-se que, fatores como valor nutricional, mitigação de substâncias nocivas, inibição da utilização da lignina, tendo em vista possuir um lento processo de decomposição, são de relevância para a escolha do adequado substrato (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Segundo Adekunle e Okolie, 2015 os substratos comumente utilizados na produção de biogás em plantas localizadas na Europa são de esterco animal e chorume, resíduos agrícolas, resíduos orgânicos biodegradáveis alimentares e de agroindústrias, fração orgânica de RSU, lodo de esgoto e culturas energéticas dedicadas como milho, *miscanthus* (espécie de gramíneas) e sorgo. DINCĂ *et al.* (2015), ao avaliar a influência de diferentes substratos em processos de digestão anaeróbia concluíram que a eficiência do processo é altamente dependente do tipo de matéria-prima, constatando que a digestão do esterco animal é mais eficiente do que a digestão da biomassa lignocelulósica devido à complexidade da lignina.

Segundo Mariani (2018), o biogás apresenta-se como um combustível multifacetado que possui uma diversidade de opções de utilização com o uso de diversos tipos de tecnologias, variando sua composição e produtividade conforme o porte, a temperatura necessária para o processo, a temperatura do ambiente externo ao biodigestor, eficiência esperada, dentre outros. A quantidade de metano produzida durante a degradação anaeróbia vai depender do tipo de tratamento biológico e do substrato utilizado. A Tabela 1 apresenta a composição do biogás para diferentes tipos de resíduos orgânicos (STOLECKA; RUSIN, 2021).

Tabela 1 - Composição do biogás para diferentes tipos de resíduos orgânicos

|                                   | <b>Resíduos domésticos</b> | <b>Lodo de estações de tratamento de águas residuais</b> | <b>Agroindústria</b>         | <b>Resíduos da Agroindústria</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| CH <sub>4</sub>                   | 50-60%                     | 60-75%                                                   | 60-75%                       | 68%                              |
| CO <sub>2</sub>                   | 34-38%                     | 19-33%                                                   | 19-33%                       | 26%                              |
| N <sub>2</sub>                    | 0-5%                       | 0-1%                                                     | 0-1%                         | --                               |
| O <sub>2</sub>                    | 0-1%                       | <0.5%                                                    | <0.5%                        | --                               |
| H <sub>2</sub> O (at 40°C)        | 6%                         | 6%                                                       | 6%                           | 6%                               |
| H <sub>2</sub> S                  | 100-900 mg/m <sup>3</sup>  | 1000-4000 mg/m <sup>3</sup>                              | 3000-10000 mg/m <sup>3</sup> | 400 mg/m <sup>3</sup>            |
| NH <sub>3</sub>                   | --                         | --                                                       | 50-100 mg/m <sup>3</sup>     | --                               |
| Aromático                         | 0-200 mg/m <sup>3</sup>    | --                                                       | --                           | --                               |
| Organoclorados ou Organofluorados | 100-800 mg/m <sup>3</sup>  |                                                          |                              |                                  |

Fonte: Stolecka; Rusin (2021).

Destaca-se ainda que, a co-digestão de diferentes substratos pode produzir uma maior quantidade de gás, quando comparado à produção isoladamente, além disso, segundo Pavi (2017), a co-digestão de diferentes matérias-primas, a depender da sinergia poderá produzir um digestato com características satisfatórias para uso como fertilizante.

Outra vantagem da co-digestão de diferentes matérias primas está na relação Carbono/Nitrogênio (C/N). Esta apresenta-se como um índice significativo em termos de digestibilidade e da variação do potencial de rendimento da biomassa (CARITAS, 2008). Uma alta razão C/N é um indicativo de consumo rápido de nitrogênio pelas bactérias metanogênicas, resultando numa baixa produção de biogás, visto que ocasiona uma baixa solubilização de proteína no sistema (REICHERT, 2005; MAO *et al.*, 2015). Já uma relação C/N baixa ocorrerá um acúmulo de amônia na biodigestão elevando o pH para valores maiores que 8,5, resultando na inibição dos micro-organismos metanogênicos (VERMA, 2002; SEABRA JR, 2017).

O valor ótimo estimado para a relação C/N deverá ser mantido entre 20:1 e 30:1 (VERMA, 2002; REICHERT, 2005; MAO *et al.*, 2015; SHRESTHA, 2016; SEABRA JR, 2017; RABII *et al.*, 2019; GHALEB *et al.*, 2020), que poderá ser alcançado pela mistura de resíduos de baixa e alta relação C/N, tais como resíduos sólidos orgânicos misturados com esgoto ou estrume animal (MONNET, 2003). Caso a proporção diminua significativamente, o nitrogênio será liberado na forma de amônia e aumentará o pH do meio. Esta condição pode perturbar o equilíbrio de nitrogênio e ter um efeito tóxico sobre as bactérias metanogênicas

(SLOPIECKA *et al.*, 2022). Adekunle e Okolie (2015) afirmam que dentre os fatores que podem afetar o valor ótimo da relação C/N destacam-se: limitação do substrato por outros fatores, além da quantidade de carbono ou nitrogênio; a eficiência da decomposição do processo; e a composição do substrato.

Em termos operacionais, é importante o enfoque no estudo da relação capacidade adequada *versus* custo aceitável, visto que o projeto deverá sempre priorizar aspectos econômicos voltados ao principal objetivo para a utilização da planta, seja esta geração de energia ou decomposição completa da matéria orgânica (FNR, 2010). Como parâmetro crítico do dimensionamento no projeto de reatores anaeróbios, tem fundamental relevância o cálculo do tempo de retenção hidráulica (TRH), que representa o tempo médio calculado que um substrato permanece no biodigestor para tratamento até a sua saída (CHERNICHARO, 2007; FNR, 2010; FERREIRA, 2015).

Meegoda (2018) afirma que um TRH com um curto período está associado à acidificação por AGV's, permitem uma maior eficiência do processo além de menos custos. Neste sentido, já segundo FNR (2010), se o TRH for curto, os micro-organismos têm pouco tempo para decompor o substrato, resultando em um rendimento insuficiente de biogás. Para a digestão de resíduos ligninocelulósicos, faz-se necessário TRH's mais longos, entre 60 e 90 dias (MEEGODA, 2018; SHI *et al.*, 2017). Desta forma, o TRH está associado a três principais parâmetros: taxa de crescimento dos micro-organismos, temperatura e composição do substrato (NALO, 2013). Ressalta-se que o TRH varia de 10 a 40 dias em processos mesofílicos (REICHERT, 2005; MAO *et al.*, 2015) e de 15 a 20 dias em processos termofílicos (JACINTO, 2014).

A Equação 1 apresenta o cálculo para o TRH, que é obtido através da razão entre o volume útil do reator e a vazão de entrada (substrato).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Onde,

TRH = tempo de retenção hidráulica (dias)

V = volume útil do reator (m<sup>3</sup>)

Q = vazão (m<sup>3</sup>/dia)

Barcelos (2009) apresenta um resumo (Tabela 2) de estudos experimentais utilizando resíduos orgânicos inoculados com lodo, onde é possível identificar diferentes tempos de retenção hidráulica.

Tabela 2 - Diferentes condições de operação observados em estudos sobre digestão anaeróbia

| Referência                      | Resíduo                       | Inóculo                                          | ST (%) | Temperatura (°C) | TRH (dias)  | Eficiência (%) |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|--------|------------------|-------------|----------------|
| Cechi <i>et al.</i> (1993)      | FORSU                         | -                                                | 20     | 37-55            | 13,5 – 14,5 | 24 – 34 (STV)  |
| Del Borghi <i>et al.</i> (1999) | Resíduos de cozinha triturado | Lodo primário e secundário                       | 1 - 4  | 55               | 12          | 56 – 63 (STV)  |
| Pavan <i>et al.</i> (1999)      | Frutas e verduras             | -                                                | 8      | 35 - 56          | 11 - 12     | 67 – 84 (STV)  |
| Xu <i>et al.</i> (2002)         | Alimentos                     | Lodo de digestor e de reator UASB                | 10     | 35               | 16          | 60 (STV)       |
| Mace <i>et al.</i> (2003)       | FORSU                         | Lodo de digestor anaeróbio industrial mesofílico | 11     | 35               | 8 - 15      | 43 – 45 (STV)  |
| Wang <i>et al.</i> (2003)       | Alimentos                     | Lodo de digestor e de reator UASB                | 10     | 35               | 36          | 78 (STV)       |

Fonte: Barcelos (2009).

### 2.2.2 Características Gerais, Tratamento e Aplicações do Biogás

As ações de decomposição através de atividades de bactérias microscópicas na biomassa provocam a liberação de gases e calor, proporcionando o surgimento do biogás, fonte de energia renovável e não poluidora resultante da fermentação anaeróbia de materiais orgânicos (COSTA, 2011), que apresenta uma composição típica com cerca de 60% de metano, 40% de dióxido de carbono e traços de uma mistura composta basicamente de

hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio.

Em termos de potencial de crescimento, o biogás é dependente da quantidade de matéria-prima a ser processada, onde o mesmo poderá ser utilizado para produzir eletricidade a ser utilizada localmente ou exportada para a rede. Segundo ANP 685/2017, se purificado 90% de  $\text{CH}_4$ , o mesmo é comumente chamado de biometano e oferece melhores condições de utilização (MILANEZ *et al.*, 2018). A crise energética mundial ressaltou a necessidade de novas fontes de energia, assim, o gás metano apresenta-se como uma alternativa presente em componentes inesgotáveis, e com efeitos nocivos, tendo em vista apresentar um potencial de aquecimento global superior ao do dióxido de carbono (COSTA, 2011). A Tabela 3 apresenta algumas propriedades que compõem o  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ .

Tabela 3 - Propriedades do metano e do dióxido de carbono

| Propriedades              | Metano                      | Dióxido de Carbono            |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Massa molar               | 16,042 g/mol                | 44,010 g/mol                  |
| Massa Específica          | 0,72 kgf/m <sup>3</sup>     | 1,96 kgf/m <sup>3</sup>       |
| Aparência                 | Gás incolor e inodoro       | Gás incolor e inodoro         |
| Ponto de fusão            | -182,5 °C                   | -78 °C                        |
| Ponto de ebulição         | -161,6 °C (para 1 atm)      | -57 °C (para 5,185 atm)       |
| Solubilidade em água      | 35 mg/l (para 20 °C e 1atm) | 1,45 g/l (para 25 °C e 1 atm) |
| Poder calorífico inferior | 35,5 MJ/m <sup>3</sup>      | 0 kcal/kg                     |

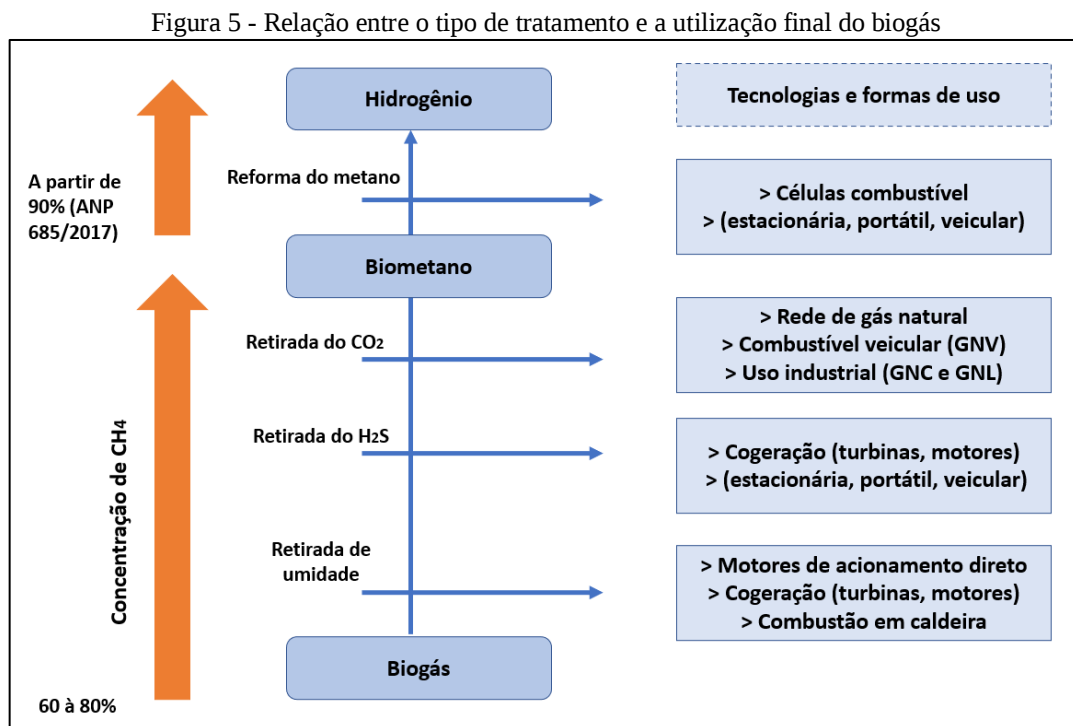
Fonte: Adaptado de Costa (2011).

Como recurso energético, em condições com 65% de  $\text{CH}_4$  e 35% de  $\text{CO}_2$ , observa-se um poder calorífico de 20,3kJ/g, ou seja, 23,3 kJ.L<sup>-1</sup> se o percentual apresentar 80% de  $\text{CH}_4$  e 20% de  $\text{CO}_2$ , o poder calorífico será de 29,9 kJ/g, o que representa aproximadamente 28,7 kJ.L<sup>-1</sup> (LIMA, 2005).

Comparando-se o poder calorífico do biogás com outras fontes energéticas, e considerando um menor potencial calorífico de 5.000 kcal/m<sup>3</sup>, observa-se que para a gasolina, o fator de equivalência se aproxima de 0,60 litros para cada 1.000 litros de biogás; para o óleo diesel, o fator é de cerca de 0,550 litros (GASPAR, 2003); já para a eletricidade, observa-se um valor de 2,05 kW (ACHINAS; EUVERINK, 2017). Estes valores podem ser alterados a depender da produção, temperatura e tipos de biodigestores adaptados para o tratamento

adequado. Assim quanto mais avançada a tecnologia dos equipamentos a serem utilizados, maior será a exigência para o tratamento ou o refino do biogás (CIBIOGÁS, 2018).

Para a seleção da tecnologia de tratamento, além do poder calorífico, devem ser observados a composição do biogás, a presença de umidade, pressão, contaminantes, gases inertes e ácidos, tendo em vista a corrosão. Assim, alguns processos de tratamento como desumidificação, desulfurização, retirada de gás carbônico e siloxanos são de grande importância para um melhor desempenho do biogás na geração de energia (CIBIOGÁS, 2018). A Figura 5 apresenta uma relação entre o tipo de tratamento e o uso final do biogás.



Fonte: Adaptado de BTE, IFEU, ISA 2004 apud Brasil, 2015

Para obter energia a partir do biogás de forma mais produtiva, priorizando ainda a relação custo-benefício, o gás deve ser enriquecido e seus poluentes eliminados. Desta forma, a remoção do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) é de extrema importância tendo em vista que a sua presença, mesmo em baixas concentrações, pode causar corrosão, que pode danificar os equipamentos do processo. A eliminação da água também deve ser realizada visto o potencial de acúmulo de condensado na tubulação. Quando a utilização do gás visa a utilização para gás natural padrão ou combustível para automóveis, o  $CO_2$  deve ser removido, uma vez que o  $CO_2$  reduz o conteúdo energético do biogás (WELLINGER; LINDBERG, 2000; OSORIO; TORRES, 2009). O Quadro 1 apresenta um resumo da descrição de cada um desses

tratamentos, bem como os processos comumente utilizados, visando à obtenção final do biogás.

Quadro 1 - Processos de tratamento e purificação do biogás

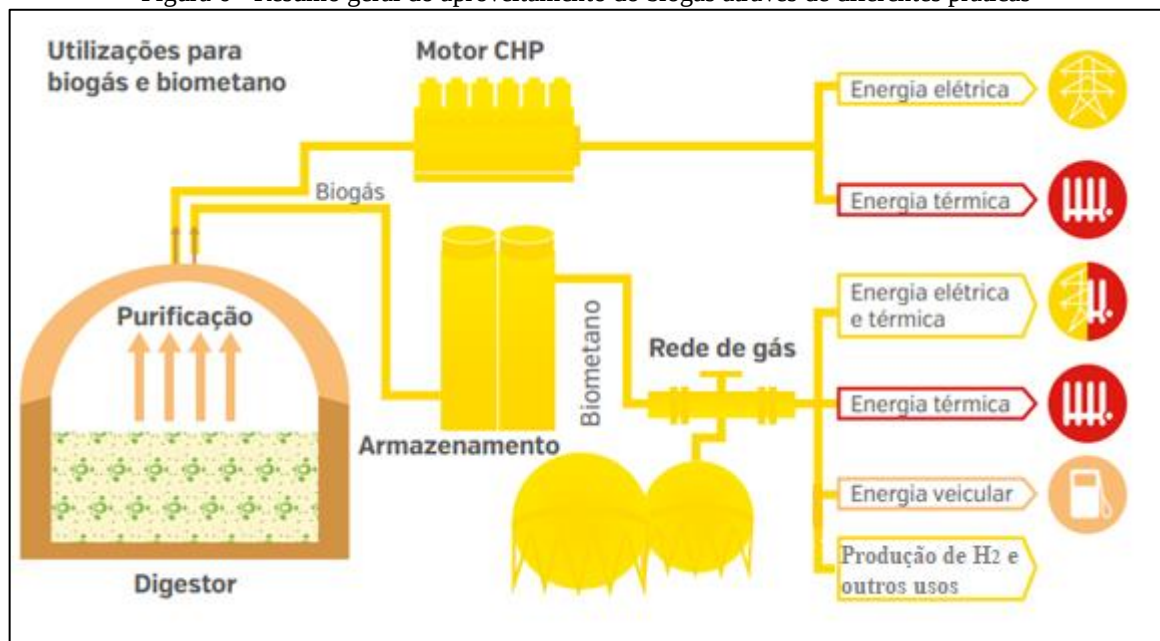
| TRATAMENTO         | OBJETIVO                                                                         | PROCESSOS                                                                    | OBSERVAÇÕES                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desumidificação    | Retirada da umidade visando evitar o desgaste e corrosão dos equipamentos        | Secagem por refrigeração                                                     | Resfriamento do biogás até o ponto de orvalho                                                                                                                                                                                                                            |
|                    |                                                                                  | Secagem por absorção                                                         | A técnica utiliza-se do processo químico tipo deliquescente onde uma substância química altamente higroscópica incorpora massa de água formando uma terceira substância como resíduo, sendo necessário assim o descarte e substituição ao final da vida útil do material |
|                    |                                                                                  | Secagem por adsorção                                                         | Os elementos mais utilizados em tal processo são: zeólitas, sílica gel e óxido de alumínio.                                                                                                                                                                              |
| Desulfurização     | Remoção do gás sulfídrico                                                        | Biodessulfurização                                                           | Oxidação biológica aeróbia do $H_2S$ através de micro-organismos, convertendo o gás sulfídrico em enxofre elementar                                                                                                                                                      |
| Retirada de $CO_2$ | Separação do gás carbônico do biogás visando o aumento da concentração de metano | Adsorção com modulação de pressão ( <i>Pressure Swing Adsorption – PSA</i> ) | Purificação do biogás através de técnicas de pressurização                                                                                                                                                                                                               |
|                    |                                                                                  | Lavagem por água ( <i>Water Scrubbing – WS</i> )                             | Separação do $CO_2$ do biogás através do princípio da solubilidade                                                                                                                                                                                                       |
|                    |                                                                                  | Método criogênico                                                            | Realizado através do Congelamento                                                                                                                                                                                                                                        |
|                    |                                                                                  | Resfriamento                                                                 | Redução do ponto de orvalho                                                                                                                                                                                                                                              |

Fonte: Adaptado de CIBIOGÁS (2018); Brasil (2015).

Com relação às aplicações comerciais advindas da produção do biogás, observa-se a geração de energia elétrica, energia térmica e energia mecânica, além da fabricação do

biometano. Observa-se que diferentes tecnologias são disponíveis para a geração, utilizando diferentes processos, onde as principais opções tecnicamente comprovadas na prática são: (a) Motores a gás estacionários (CHP) para gerar energia elétrica e térmica; (b) Caldeiras a gás para gerar energia térmica e (c) Injeção na rede de gás natural através da purificação do biogás a biometano, que poderá possibilitar o aproveitamento como forma de energia elétrica, térmica e energia veicular (BRASIL, 2015; CIBIOGÁS, 2018). A Figura 6 apresenta uma visão geral do aproveitamento do biogás.

Figura 6 - Resumo geral do aproveitamento do biogás através de diferentes práticas



Fonte: Adaptado de Brasil (2015).

É importante destacar que, a produção do biometano, para uso e comercialização em território nacional, deve seguir as instruções realizadas pela norma ANP n. 685/2017 da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), que estabelece regras para a aprovação e controle de qualidade, além de obrigações quanto ao biometano, requerendo assim, os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, como direcionados ao gás natural. Os limites especificados segundo a norma são valores referidos a temperatura de 20°C e de 1atm de pressão em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água. Para a Região Nordeste, a norma especifica que o Poder Calorífico Superior (PCS) deve estar em torno de 35.000 a 43.000 kJ/m<sup>3</sup>, o que representa em torno de 9,72 a 11,94 kWh/m<sup>3</sup> e uma quantidade mínima de metano de 90%.

### 2.2.3 Características Gerais, Tratamento e Aplicações do Digestato

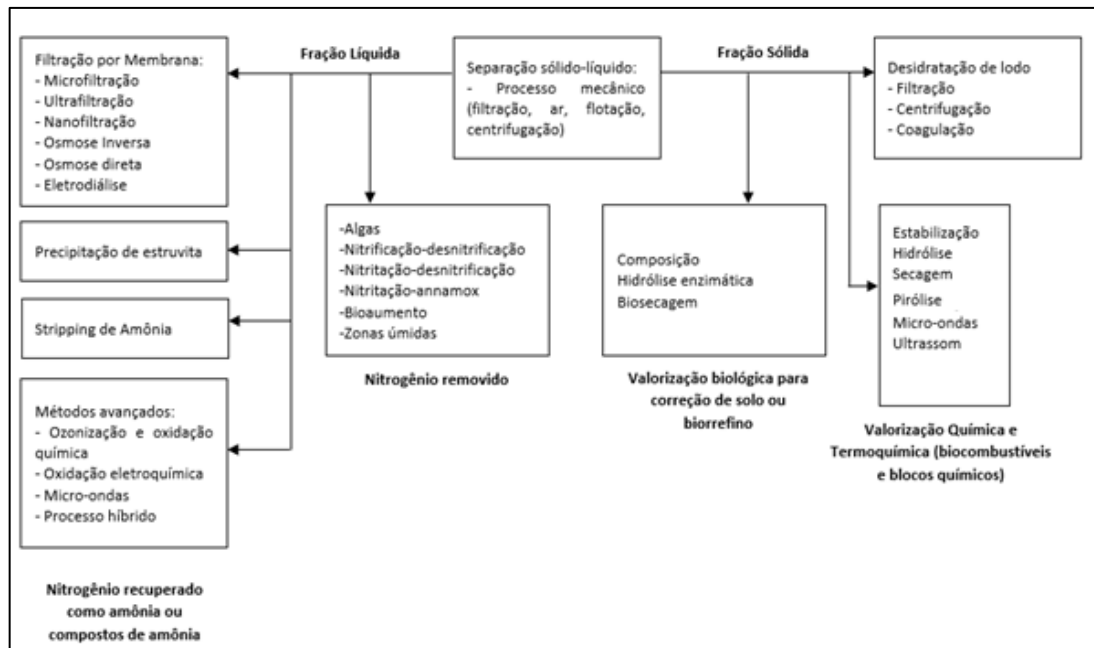
O biogás produzido através do processo da digestão anaeróbia em biodigestores em condições controladas é uma grande fonte de energia renovável. Advindo deste processo, observa-se ainda a formação do digestato, que é um subproduto da digestão anaeróbia e pode ser considerado resíduo ou produto de potencial uso para a indústria química ou agricultura (MONFET *et al.*, 2018), visto que, apresenta-se como um biofertilizante valioso, que poderá ser aplicado ao solo, a depender de características como: nutrientes, pH e quantidade de matéria orgânica (AL SEADI *et al.*, 2012). O crescimento no âmbito da tecnologia da digestão anaeróbia resultou num aumento não só do biogás, como na quantidade de digestato obtida, onde no ano de 2013, observou-se uma geração de cerca de 80 milhões de toneladas de digerido por ano apenas na Europa, em decorrência de 13.000 plantas de geração de biogás (Fachverband Biogas / EBA / BiPRO, 2013).

O uso do digestato como condicionador do solo promove a economia circular, bem como o desenvolvimento sustentável da produção de biogás, porém, a utilização do digesto ainda é vista como um dos entraves para o desenvolvimento da indústria de biogás. Assim, antes da aplicação do material digerido faz-se necessária a realização de um tratamento com o intuito de reduzir o volume e a fitotoxicidade, acelerar a estabilização, bem como conservar os nutrientes (LU; XU, 2021). A recuperação e remoção de nutrientes do digestato pode ser conseguida através de processos mecânicos, físico-químicos ou biológicos.

Segundo Monfet *et al.* (2018), existem 14 possíveis categorias de processos para tratamento do digestato: (1) espessamento, (2) desidratação, (3) membrana de filtração, (4) precipitação de estruvita, (5) remoção de amônia, (6) oxidação de amônia, (7) radiação de micro-ondas, (8) ajuste de pH, (9) hidrólise química, (10) secagem térmica, (11) combustão, (12) pirólise, (13) gaseificação e (14) ultrassom. No entanto, aspectos críticos no tratamento pós-digestão de resíduos alimentares digeridos e seus impactos ambientais não foram sistematicamente estudados. Segundo os autores, estudos recentes mostram que combiná-los para criar processos híbridos aumenta as possibilidades de valorização do digestato.

A Figura 7 apresenta uma matriz de processos de acordo com o uso final do digestato.

Figura 7- Matriz de processos com base no uso final do digestato



Fonte: Adaptado de Monfet *et al.* (2018)

Kupper *et al.* (2014) alertam sobre a importância de realizar análises no digestato, tendo em vista que podem haver problemas relacionados a metais pesados, onde a separação indevida do material orgânico com outros materiais pode ocasionar em problemas ao digestato. Brandli (2006) ao estudar os poluentes orgânicos em compostos e digestatos, identificou metais pesados em algumas amostras e intensificou sobre a necessidade desses estudos e medidas para o controle de qualidade e avaliação de risco.

Kupper *et al.* (2006) ao avaliarem o composto e o digestato derivados de resíduos orgânicos produzidos separadamente e coletados em 25 Estados membros da União Europeia observaram que, apesar de um alto conteúdo de carga de hidrocarbonetos poliaromáticos, nenhum problema de contaminação foi identificado. Porém, segundo os autores, são necessárias discussões sobre o assunto, visando eliminar os potenciais riscos, para garantir uma reciclagem segura e sustentável do material.

Fachverband Biogas, EBA e BiPRO (2013) analisaram cerca de 1.800 amostras de digestato entre os anos de 2009 e 2012 na União Europeia e observou uma média aritmética de 5,7% de matéria seca, sendo 90% das amostras analisadas apresentando um percentual de 9,1%, com uma quantidade média de matéria orgânica de 69,3%, e um pH médio de 7,9.

A qualidade do digestato pode ser avaliada através de aspectos relacionados à presença de metais pesados e outros contaminantes inorgânicos, contaminantes orgânicos persistentes (como pesticidas, resíduos ou antibióticos) e presença de nutrientes. É importante destacar

que, os nutrientes essenciais das plantas como nitrogênio, fósforo e potássio, permanecem em sua maioria no digestato. Em geral, os principais problemas relacionados ao controle da qualidade deste tipo de material estão atrelados aos patógenos encontrados. Em termos físicos, podem ser ainda encontrados materiais indesejados em virtude da separação antes da entrada no biodigestor (MONNET, 2003).

Uma iniciativa da União Europeia visando complementar o cumprimento dos objetivos da Diretiva 1999/31/CE sobre os aterros foi apresentada no Documento de Trabalho sobre Tratamento Biológico de Resíduos Biodegradáveis com valores-limites para os compostos digeridos, visando garantir principalmente benefícios ao solo, à saúde humana, animal e vegetal (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

No Brasil, o Decreto n.º 86.955 de 18 de fevereiro de 1982 do Ministério da Agricultura, apresenta disposição sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. A Instrução Normativa DAS/MAPA n.º 28 de 25 de setembro de 2009 apresentam algumas determinações relativas à utilização de métodos analíticos oficiais para determinação dos agentes patogênicos a plantas em substratos.

### 2.3 PRODUÇÃO MUNDIAL DE BIOGÁS E BIOMETANO

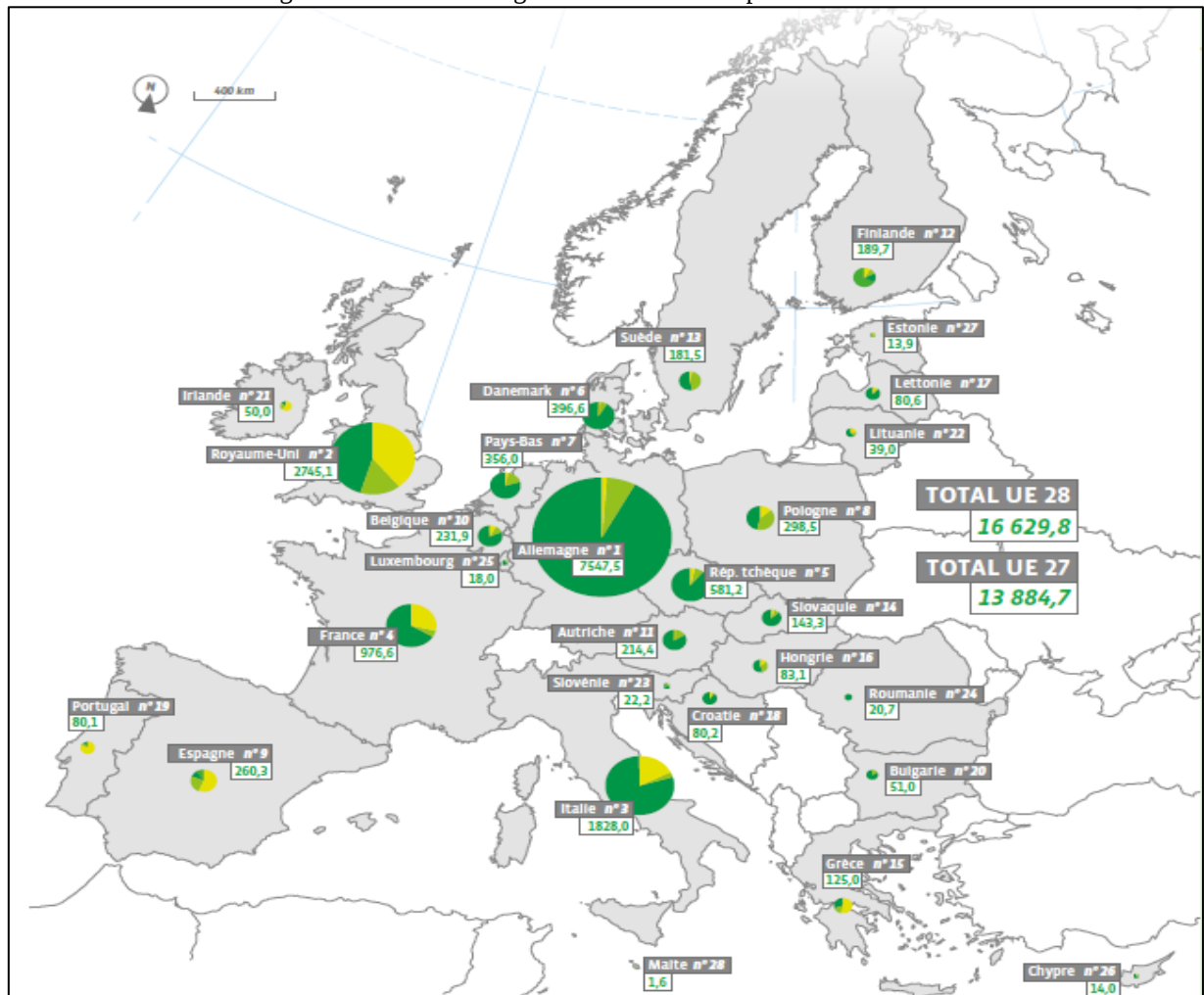
A tecnologia da digestão anaeróbia apresenta-se como promissora para a produção de energia renovável, utilizada comumente no tratamento de resíduos agrícolas, industriais, resíduos orgânicos advindos da coleta de RSU, resíduos alimentares e estrumes de animal. A Europa destaca-se no que se refere à produção de biogás. No ano de 2015, 63,3 TWh de eletricidade proveniente do biogás foram produzidos no continente, o que equivale a um consumo anual de 14,6 milhões de famílias no local (SHRESTHA *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2016). Em 2019, a Europa apresentou-se como líder no fornecimento de biogás, com uma participação global de 72%. Dos 655 TWh de energia gerados a partir de biomassa globalmente, o biogás teve uma participação de 13% (WBA, 2021).

Segundo a World Biogas Association (2019), estima-se que há um total de cerca de 132.000 digestores de pequeno, médio ou grande porte operando no mundo, onde na China observa-se um total de 110.448 sistemas de biogás em operação, dos quais 6.972 são de grande escala. Já a Europa possui 17.783 usinas com 10,5 GW de capacidade instalada, onde a Alemanha é líder no mercado europeu com 10.971 fábricas seguida pela Itália (1.655),

França (742), Suíça (632) e Reino Unido (613). Nos EUA operam 2.200 digestores anaeróbios com capacidade instalada de 977MW.

Na Alemanha, a reforma da Lei das Fontes Renováveis de Energia (EEG) possuiu um papel fundamental no sucesso da transição energética do país (PEREIRA *et al.*, 2016; IEA, 2017). A Figura 8 apresenta uma distribuição do quantitativo de plantas de produção de biogás na Europa. Os dados obtidos afirmam que a Alemanha, o Reino Unido e a Itália apresentaram os maiores quantitativos de plantas na Europa.

Figura 8 - Plantas de biogás instaladas na Europa no ano de 2019

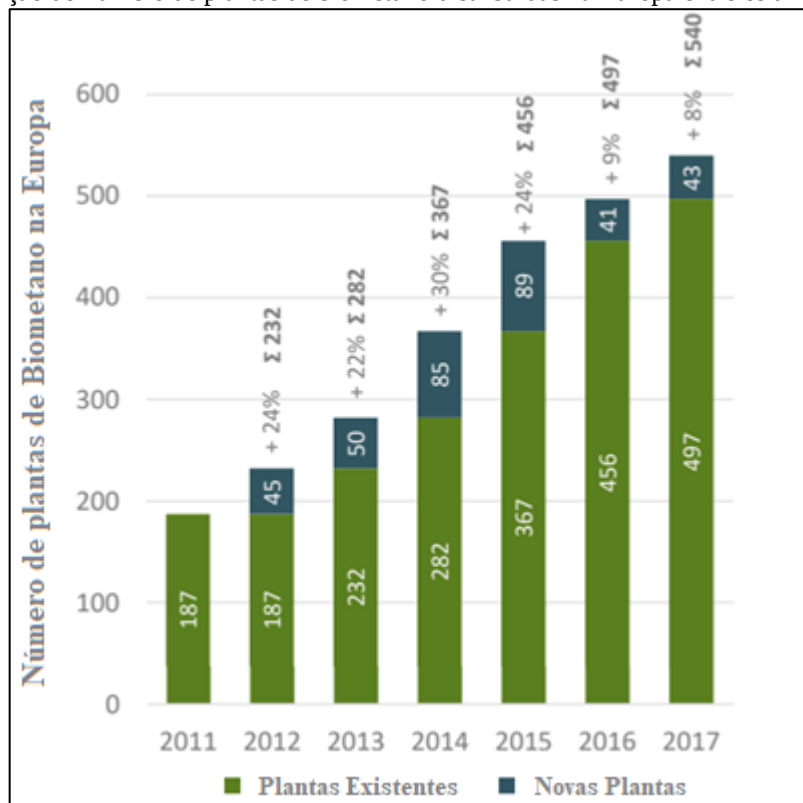


Fonte: EurObserv'ER (2020).

Na Europa, 99% do biogás produzido é utilizado na geração de eletricidade e calor (PEREIRA *et al.*, 2016). Comparado ao setor de biogás, o biometano apesar de purificar o metano ainda aparece com uma menor quantidade de plantas mundialmente. Entretanto, o número de usinas de biometano aumentou rapidamente nos últimos anos, passando de 187

plantas em 2011 para um total de 540 plantas em 2017 na Europa, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9 - Evolução do número de plantas de biometano distribuídas na Europa entre os anos de 2011 e 2017



Fonte: Adaptado de European Biogas Association (2018)

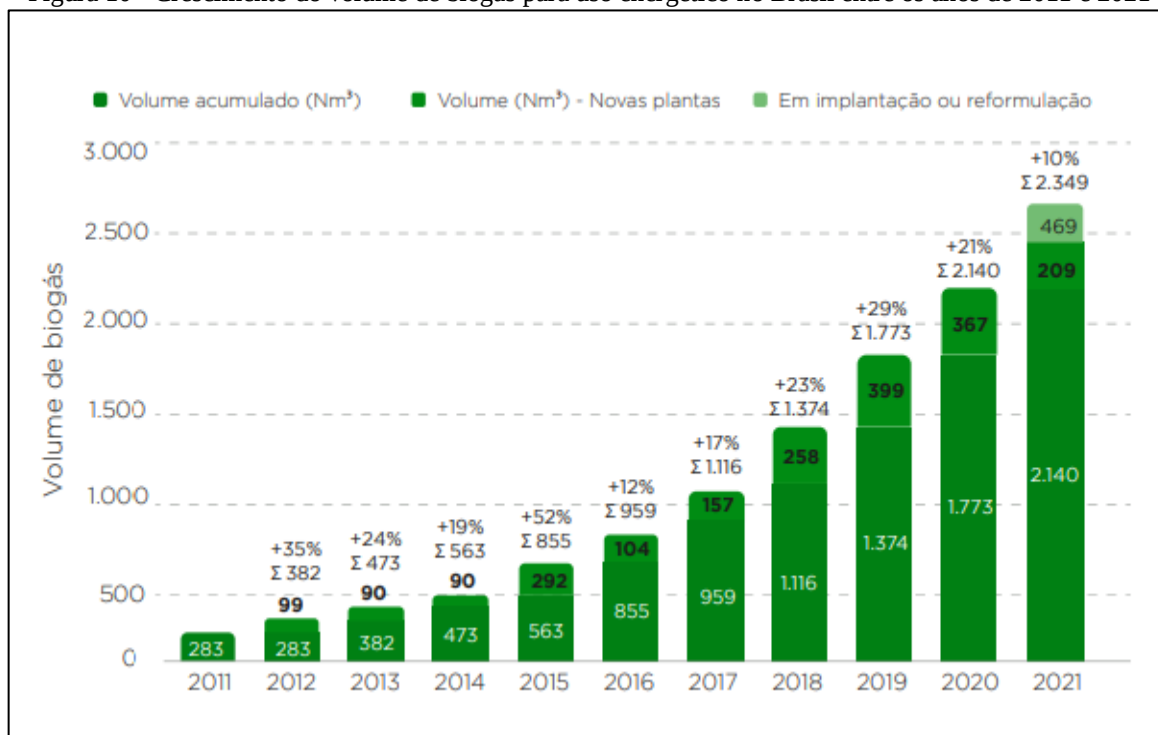
O Brasil, apesar de apresentar uma alta participação de energia renovável na matriz energética nacional, ainda apresenta números distantes dos apresentados por países europeus, onde em termos de produção de biogás, no ano de 2016, o país registrava 165 usinas em operação, com produção total em torno de 2,2 milhões de  $\text{Nm}^3.\text{dia}^{-1}$ , o que representava aproximadamente  $5.219 \text{ GWh.ano}^{-1}$  em termos de energia, sendo o maior percentual do total de biogás produzido em aterros sanitários (IEA, 2017).

Mariani (2018), ao realizar o estudo do diagnóstico e propostas para o biogás no país identificou que, a maior parte das plantas de biogás cadastradas para o ano de 2015 estavam localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo as plantas de maior porte distribuídas no Estado do Paraná e de São Paulo.

Segundo o CIbiogás (2022), atualmente são 811 plantas de biogás cadastradas, com uma produção de 2,82 bilhões de  $\text{Nm}^3.\text{dia}^{-1}$ . Destas, 755 plantas em operação, todas centralizadas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

No que concerne ao volume de biogás para fins energéticos, observou-se um aumento de 10% entre os anos de 2020 e 2021, conforme apresentado na Figura 10, chegando a atingir 2,3 bilhões de m<sup>3</sup> em 2021.

Figura 10 - Crescimento do volume de biogás para uso energético no Brasil entre os anos de 2011 e 2021



Fonte: CIbiogás (2022).

Em virtude das mudanças de regulamentação, observa-se que o uso do biogás vem apresentando novos índices no país, onde se destaca as determinações da Resolução nº 685/2017 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), além do acordo assinado em Paris, na COP21, no qual o Brasil se comprometeu a reduzir em até 43% as emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2030.

## 2.4 TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os biodigestores anaeróbios podem ser definidos como câmaras fechadas, em condições controladas, que quando realiza o tratamento do resíduo, em especial o substrato orgânico em situação de anaerobiose, fornece como produto o biogás e o digestato. Para essa finalidade ocorre a atuação de diversificados micro-organismos, fator este que pode exigir tempos de detenção hidráulica elevados até a decomposição (REIS, 2012; KADER *et al.*, 2015; FAGERSTRÖM *et al.*, 2018).

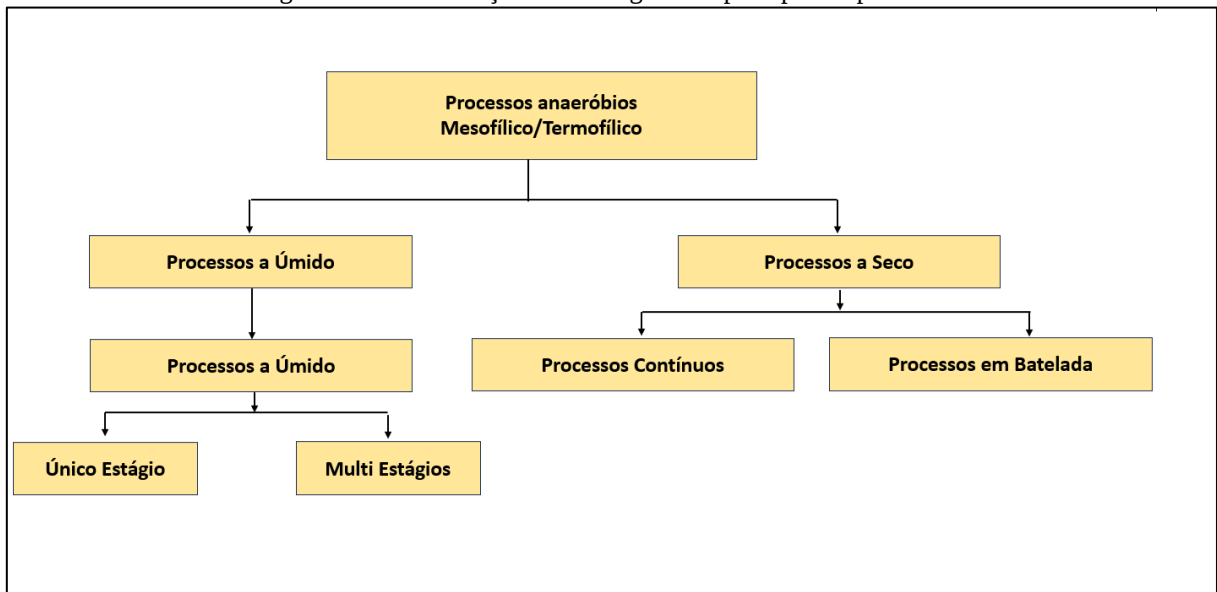
A digestão anaeróbia, é uma tecnologia de tratamento de resíduos que além de oferecer energia, reduz impactos ambientais oriundos da emissão de gases em aterros sanitários. Para o desenvolvimento das plantas de digestão anaeróbia é necessário um estudo prévio com vistas à construção e operação. De maneira geral, o tempo de tratamento dos resíduos em biodigestores anaeróbios é de aproximadamente três semanas, a depender do substrato e das condições operacionais, seguida pelas etapas de desidratação mecânica e secagem térmica (FRICKE *et al.*, 2015).

Segundo Vandevire (2002), a comparação de dados para publicação de artigos e pesquisas relacionados aos biodigestores apresenta relativa dificuldade, tendo em vista a diversidade de projetos de reatores existentes, com diferentes direcionamentos sejam esses em âmbitos operacionais, como temperatura, TDH, mistura, composição, dentre outros, além de relacionados à estrutura do equipamento.

Kunz *et al.* (2019) afirmam que os biodigestores são classificados a depender de três diferentes tipos de parâmetros: (1) regime de alimentação (batelada ou contínuo); (2) forma de alimentação (ascendente ou laminar); (3) concentração de sólidos no reator (digestão sólida, semissólida e úmida).

Segundo Fricke *et al.* (2015), a classificação por tipo de processos fornece a base do estado atual da biodigestão anaeróbia na Alemanha. A classificação é realizada considerando principalmente: (1) as duas faixas de temperaturas relevantes onde os micro-organismos apresentem o desempenho ótimo, ou seja, na faixa mesofílica, e na faixa termofílica, com temperaturas; (2) o teor de umidade do material, conceituado de processos úmidos ou a seco; (3) a alimentação do reator através do tipo de operação, sendo eles do tipo contínuos ou em batelada. A Figura 11 apresenta um fluxograma com base na classificação segundo os diferentes tipos de processo segundo Fricke *et al.* (2015).

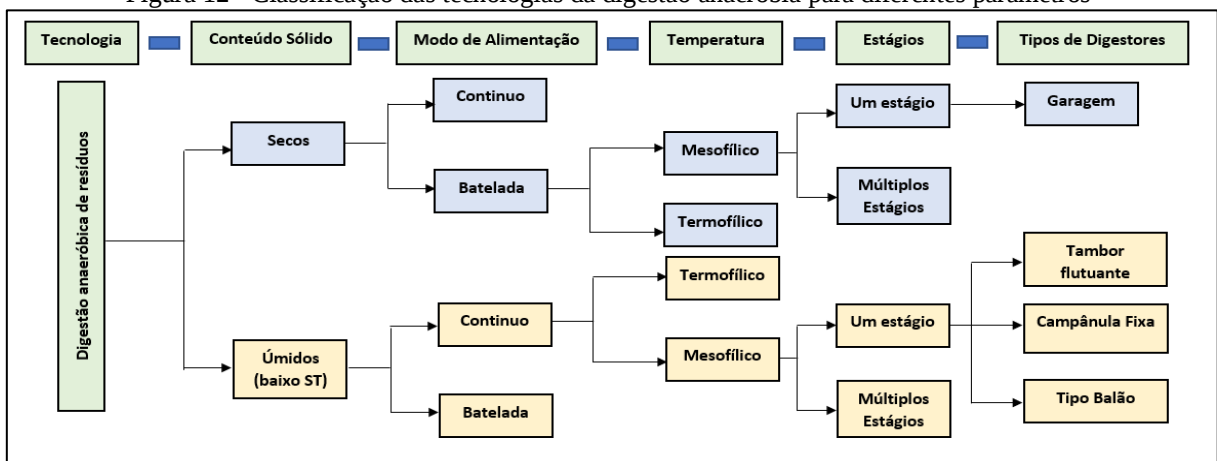
Figura 11 - Classificação dos biodigestores por tipos de processos



Fonte: Adaptado de Fricke *et al.* (2015)

Estudos realizados por Van *et al.* (2019) e Mahmudul *et al.* (2021) apontam que, os dois parâmetros principais a serem escolhidos para projetar um reator depende do número de estágios e a concentração de sólidos totais, visto que esses parâmetros podem afetar significativamente o custo total do reator, seu desempenho e confiabilidade. A Figura 12 apresenta uma categorização resumida das diferentes classificações de tecnologias de digestão anaeróbia.

Figura 12 - Classificação das tecnologias da digestão anaeróbia para diferentes parâmetros



Fonte: Adaptado de Mahmudul *et al.* (2021).

Segundo Cibiogás *et al.* (2018), a tecnologia deverá ser dimensionada levando em consideração o substrato a ser tratado, visando as expectativas relacionadas a demanda por

fertilizante, expectativa de produção, características do meio – principalmente no que tange a temperatura –, além da demanda energética local.

O processo de metanização seca descontínua, ou em bateladas, é comumente denominado de extrasseco, ou do tipo garagem. Neste processo, geralmente composto por 5 ou mais reatores com um formato de garagem, a alimentação é realizada por meio de carregadeiras, possibilitando a presença de materiais com menor índice de segregação, onde após a introdução do substrato, o oxigênio é retirado visando possibilitar uma condição anaeróbia para degradação do material. A taxa de geração de biogás neste sistema é de cerca de  $90\text{Nm}^3\text{biogás.t}^{-1}.\text{RSU}$  (BRASIL, 2016).

#### **2.4.1 Classificação com base na quantidade de sólidos totais do substrato**

O processo da digestão anaeróbia poderá ser categorizado em três classes principais com base no conteúdo de sólidos totais do substrato: digestão anaeróbia em base úmida com  $\text{ST} < 15\%$ ; digestão anaeróbia em base seca, com  $\text{ST} < 25\%$ ; e estado sólido operado com um teor de ST de até  $40\%$  (DI MARIA *et al.*, 2017; VAN *et al.*, 2019 e MAHMUDUL *et al.*, 2021). Atualmente, as técnicas de digestão anaeróbia úmida e seca são mais usadas para a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (DI MARIA *et al.*, 2017).

Segundo Brasil (2015), os processos a seco operam com um teor de sólidos totais em torno de 15 a  $35\%$ , com o tratamento sendo realizado normalmente para a fração orgânica dos resíduos sólidos. Uma característica desse processo é que existe a necessidade da realização de recirculação do lixiviado sobre a fração sólida, garantindo a umidade ao processo.

O processo a úmido se diferencia do processo a seco principalmente por ser realizado apenas através da alimentação contínua, e por ser operado através de fase única – dentro de um único reator – ou através de fases separadas – em ambientes separados –, possibilitando uma melhor adaptação das condições específicas aos micro-organismos, propiciando assim um melhor controle entre as fases (VERMA, 2002; FRICKE *et al.*, 2015). Em termos de percentual de sólidos totais, o processo por via úmida opera com valores menores que  $15\%$  (BRASIL, 2015; FRICKE *et al.*, 2015), sendo assim indicado para resíduos previamente separados, com maior teor de matéria orgânica.

O Quadro 2 apresenta um comparativo entre os diferentes tipos de processos para o tratamento anaeróbio de resíduos, com os requisitos básicos para operação, vantagens e desvantagens.

Ressalta-se ainda que, a taxa de carregamento orgânico é definida como a capacidade do sistema de digestão anaeróbia para a conversão biológica ou a quantidade de alimentação de material orgânico para o sistema diariamente por m<sup>3</sup> de volume do digestor. A comparação entre os sistemas apresenta que, a taxa de produção de biogás no sistema úmido é menor do que no sistema seco (MAHMUDUL *et al.*, 2021).

Quadro 2 - Comparação das tecnologias de tratamento de resíduos visando a produção de biogás

|              | Digestão Anaeróbia Seca Descontínua Garagem                                                                                                                    | Digestão Anaeróbia Seca Contínua                                                                                                                          | Digestão Anaeróbia Úmida Contínua CSTR                                                                                                                                                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Requisitos   | Sólidos Totais de 35 a 50%                                                                                                                                     | Sólidos Totais de 15 a 35%                                                                                                                                | Sólidos Totais de 3 a 15% (bombeável)                                                                                                                                                                                                       |
|              | Substratos mistos relativamente secos, poucos selecionados, com grande quantidade de impurezas                                                                 | Substrato misto separado com trituração e, eventualmente, umidificação com água                                                                           | Substratos com teor de umidade mais alto, bem separados, nível aceitável de impureza <5%                                                                                                                                                    |
|              | Amplamente aplicáveis para RSU                                                                                                                                 |                                                                                                                                                           | Aplicação limitada                                                                                                                                                                                                                          |
| Vantagens    | Eficiente forma de tratamento de resíduos com a oportunidade de aproveitamento do biogás. Utilizável como processo termofílico com a higienização do digestato |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                             |
|              | Em comparação com a digestão contínua:<br><br>Pouca preparação do substrato. Baixa utilização de energia e equipamentos. Tecnologia modular.                   | Em comparação com a digestão descontínua<br><br>Maior eficiência energética.<br>Alta estabilidade do processo.<br>Controle das emissões de metano.        | Em geral:<br><br>Alta taxa de produção de gás<br>Alta estabilidade de processo.<br>Controle das emissões de metano<br>Digestato utilizável na agricultura.                                                                                  |
| Desvantagens | Demanda de maior área. Maiores emissões de metano, com consequente menos aproveitamento energético. Grande quantidade de resíduo gerado e transporte caro.     | Desgaste dos equipamentos mecânicos. Necessidade de alimentação contínua, de armazenagem dos resíduos e, consequentemente, custos e logísticas exigentes. | Separação e preparação do substrato muito exigentes. Desgaste dos equipamentos mecânicos. O fluxo homogeneizado exige volume de armazenamento. O desaguamento do digestato cria grande quantidade de efluente líquido que exige tratamento. |
|              | Digestato não aplicável na agricultura em alguns países                                                                                                        |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                             |

Fonte: Adaptado de Probiogás (2015)

#### 2.4.2 Classificação com base no regime de alimentação

Com base no modo de alimentação, o processo de digestão anaeróbia pode ser classificado como batelada ou contínuo. No sistema em batelada, os digestores são tecnologicamente simples e têm baixas necessidades de investimento, manutenção e perdas de energia, onde a alimentação é realizada no digestor uma única vez para anaerobicamente degradar o substrato (Kothari *et al.*, 2014). Segundo FNR (2010), a taxa de produção de gás neste processo varia ao longo do tempo de forma lenta, chegando a atingir o seu maior percentual de produção após alguns dias e decrescendo gradativamente.

Já os sistemas contínuos, oferecem produção constante de biogás, visto a alimentação de novos resíduos ser realizada continuamente em substituição da quantidade de resíduos digeridos (Kothari *et al.*, 2014). São caracterizados pela alimentação do reator em intervalos regulares, e retirada de material já digeridos, na mesma quantidade (FRICKE *et al.*, 2015). Neste regime de alimentação, os biodigestores em geral apresentam uma produção de gás uniforme, com utilização eficiente do espaço, operando em capacidade alta, sendo esvaziado apenas para possíveis reparos (FNR, 2010).

Deublein e Steinhauser (2008) sugerem que antes de realizar a instalação e operação de um sistema de digestão anaeróbia em escala real, faz-se necessário a realização de testes em escalas experimentais, visando identificar a eficiência do processo até atingir os cenários ideais a nível de resíduo a ser tratado. Desta forma, a realização de testes em sistemas em batelada ou contínuo são de extrema relevância para a identificação do sistema adequado.

#### 2.4.3 Classificação com base no número de estágios

A classificação com base no número de estágios indica que, os sistemas de alimentação contínua podem ocorrer em reatores de único estágio, onde todas as reações bioquímicas acontecem em um reator, ou em reatores de dois estágios ou mesmo multiestágio onde a hidrólise/acidificação e processos de acetogênese e metanogênese são separados (KIYASUDEEN *et al.*, 2016; RABII *et al.*, 2019), visando principalmente evitar os problemas de inibição de pH de sistemas de um estágio (GRIMBERG *et al.*, 2015).

Na Europa, 95% das plantas em escala real normalmente funcionam com base em um processo de digestão anaeróbia de um único estágio visando a produção de biogás, onde neste processo, as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese ocorrem simultaneamente em um reator (BOUALLAGUI *et al.*, 2009, JIANG, 2013; PRAMANIK *et*

*al.*, 2019). O desempenho de um sistema de digestão anaeróbia realizado através de um único reator pode ser afetado por condições operacionais, tais como o tempo de retenção hidráulica e a taxa de carregamento orgânico. A produção de biogás pode diminuir se a taxa de alimentação no reator estiver além o nível ótimo, e então, falhas do sistema podem ocorrer devido à sobrecarga (KOTHARI *et al.*, 2014; PRAMANIK *et al.*, 2019). O funcionamento e correção de tais sistemas com elevada carga orgânica torna-se difícil, tendo em vista a rápida acidificação, resultando na inibição da metanogênese (BOUALLAGUI *et al.*, 2009, JIANG, 2013).

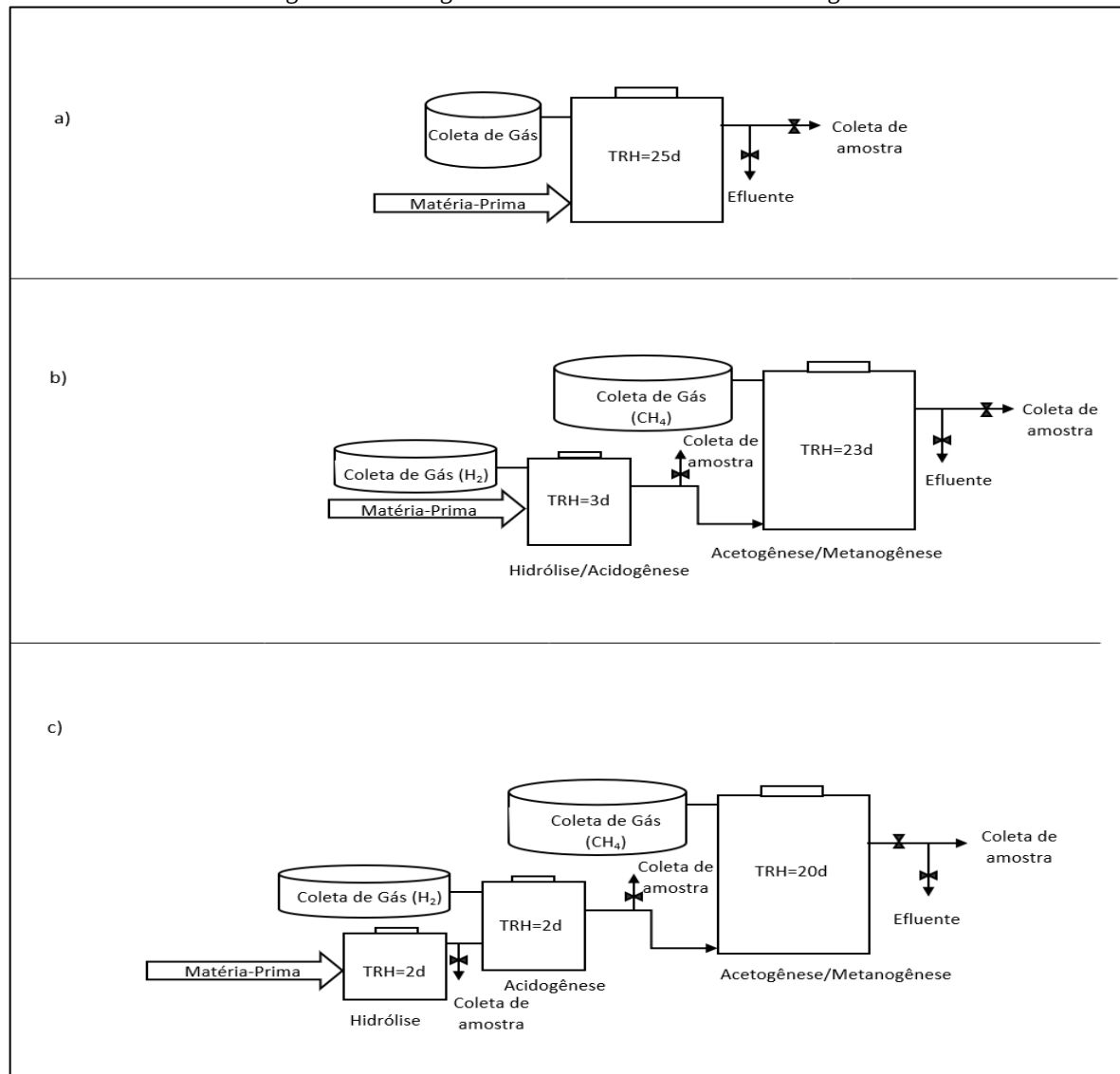
Pramanik *et al.* (2019), ao estudar o desempenho de um tanque de 160 L de um reator anaeróbio de estágio único no tratamento de resíduos orgânicos constatou que após operação em diferentes tempos de retenção de 124, 62 e 35 dias sob condições mesofílicas, o biogás máximo e o rendimento de metano alcançado foram de 0,934 L/gSV e 0,607 L CH<sub>4</sub>/gSV, respectivamente, a um TRH de 124 dias. Quando a TRH diminuiu para 62 dias, o acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) e amônia aumentou rapidamente, enquanto o pH, a produção de metano e a produção de biogás diminuíram continuamente.

Dentre os principais benefícios de um sistema de estágio único incluem um menor investimento de capital e um menor custo de manutenção em comparação com sistemas de dois e vários estágios (XU *et al.*, 2018).

A concepção da formulação dos sistemas de vários estágios tenta promover uma separação dos processos de hidrólise/acidificação dos processos de acetogênese/metanogênese, visando alcançar a operação específica do processo, melhorando o desempenho da digestão (KIYASUDEEN *et al.*, 2016; SRISOWMEYA *et al.*, 2020).

A etapa de acidificação em reatores em múltiplos estágios é realizada com uma operação com baixa retenção hidráulica com o pH em torno de 5,0–6,0. Já o estágio metanogênico é operado com retenção hidráulica comparativamente mais alta geralmente de 20 a 30 dias facilitando a proliferação de metanogênicos e pH variando entre 6,0 e 8,0, sendo este um ambiente mais favorável para metanogênicos (KINNUNEN *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2017; SRISOWMEYA *et al.*, 2020). Os principais benefícios do processo de dois estágios sobre o sistema de estágio único são maior rendimento de CH<sub>4</sub>, maior confiabilidade do processo e melhor controle dos patógenos (HAGOS *et al.*, 2017). A Figura 13 ilustra de forma representativa as três possíveis configurações de biodigestores anaeróbios em diferentes estágios.

Figura 13 - Biodigestores anaeróbios em diferentes estágios



Fonte: Adaptado de Rabii *et al.* (2019)

## 2.5 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E METANO EM BIODIGESTORES ANAERÓBIOS DE DIFERENTES ESCALAS

A estimativa da geração de biogás através de células experimentais é usualmente utilizada para as diferentes tecnologias de tratamento, visando a precisão da geração do biogás, e principalmente do  $CH_4$  (CALDAS, 2011). Alves (2008) afirma que a importância da previsão está atrelada na avaliação do balanço energético e econômico, podendo ser realizada por meio de formulações teóricas e experimentais.

Desta forma, algumas formulações experimentais são realizadas através do desenvolvimento de reatores em escala de laboratório, que conseguem estimar principalmente

a quantidade de biogás gerada, permitindo a realização do controle das principais variáveis envolvidas (JUCÁ *et al.*, 2005; MOTTA, 2011).

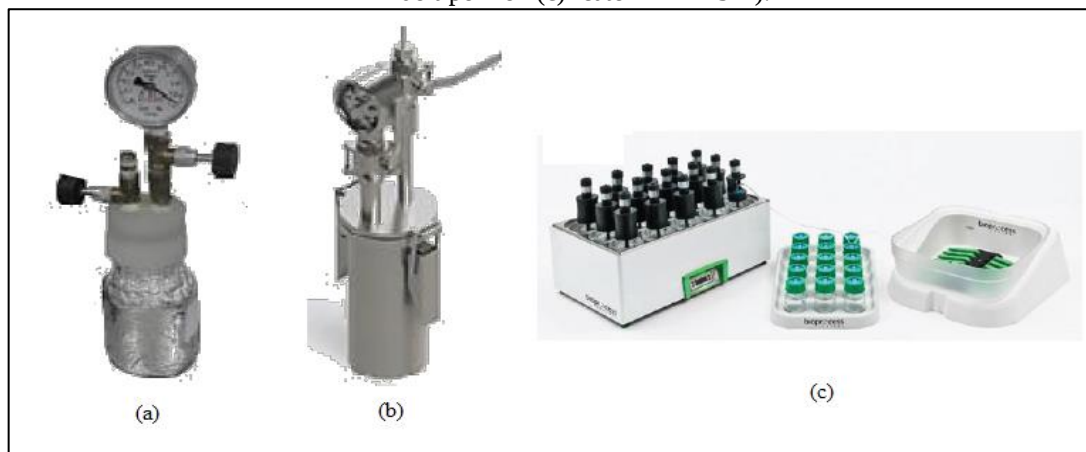
Alcântara (2007) ao avaliar a influência da composição dos RSU através de lisímetros, afirmou que, a realização de experimentos em escalas menores possibilita a simulação de situações particulares para realizar análise de causa e efeito, como analisar o comportamento das diferentes composições dos resíduos, a codisposição quando realizada para ensaios em aterros sanitários, além de aspectos como temperatura, umidade, pressão, degradação dos resíduos, dentre outros. Ainda segundo o autor, os experimentos em escalas menores podem ser montados a um custo menor, com fácil operação, o que permite ainda a simulação das condições ambientais presentes.

#### **2.5.1 Biodigestores Anaeróbios em Escala de Laboratório – Potencial Bioquímico do Metano (BMP)**

Um dos ensaios em escala de laboratório comumente utilizado em pesquisas científicas é o de BMP (*Biochemical Methane Potential*), que permite avaliar o desempenho da sinergia entre inóculos e substratos em ambientes livres de oxigênio, em condições controladas de temperatura, possibilitando a obtenção dos resultados de produção máxima de geração de biogás, e ainda a avaliação da biodegradabilidade (HANSEN *et al.*, 2004; ALVES, 2008; ANGELIDAKI *et al.*, 2009; FIRMO, 2013). Estes reatores podem apresentar diferentes configurações, sendo automatizados ou manuais (VALENÇA, 2017), conforme apresentado na Figura 14.

Segundo Hagos *et al.* (2017), os experimentos realizados através do ensaio de BMP podem ser usados para determinar a quantidade de materiais orgânicos nos substratos que podem ser convertidos em metano (biogás) em um determinado tempo; material orgânico restante para posterior gestão; a quantidade de resíduos não biodegradáveis após o tratamento e avaliar a eficiência potencial do processo para uma determinada combinação de substratos.

Figura 14 - Diferentes tipos de equipamentos para ensaios de BMP ((a) reator BMP de borossilicato, (b) reator BMP do tipo inox (c) reator AMPTS II).



Fonte: Firmo (2013); Holanda (2016); Bioprocess Control (2014)

Os reatores de borossilicato (Figura 14a) possuem um volume de 250mL, vedação através de rosqueamento e medição de gás através do sistema manométrico. Os reatores de aço inox (Figura 14b) foram desenvolvidos por Holanda (2016), e possuem volume de 443 mL, com a vedação realizada através de alças de compressão e medição de gás também realizada através de sistema manométrico. Já os reatores do tipo AMPTSII (Figura 14c) são de borossilicato, com volume de 500 mL, com vedação realizada através de rosqueamento, diferindo dos demais reatores principalmente no sistema de medição de gás através do método volumétrico, além da vantagem da automação operacional do equipamento.

Para esta pesquisa, será utilizado o sistema experimental da Figura 15a, que é composto por frascos de borossilicato de capacidade para 250mL, com tampas rosqueadas de nylon, contendo duas válvulas, sendo uma para coleta do biogás e outra para o acoplamento do manômetro de 98,07kPa com escala de 9,8kPa. Anéis de borracha e vaselina são utilizados nas conexões visando garantir uma melhor vedação. O método adotado é baseado nos estudos descritos por Hansen *et al.* (2004) e adaptada por Alves (2008), Melo (2010), Firmo (2013), Brito (2015), Lucena (2016) e Valença (2017).

## 2.5.2 Biodigestores Anaeróbios em Escala Intermediária

Outro tipo de reator que poderá ser utilizado visando à verificação do potencial de geração de biogás são os de escala intermediária – também chamados de reatores em escala piloto –, que tem como intuito se aproximar ainda mais da condição da escala real, visto possuir um volume significativo entre os de pequena escala e os de escala de campo.

Ferreira (2015), realizou um estudo para avaliar o desempenho de um sistema de metanização de resíduos com aproveitamento energético do biogás. O sistema estava instalado no Campus Pampulha da UFMG e utilizava como inóculos (1) o lodo de reator anaeróbio mesofílico do tipo UASB e (2) rúmen bovino proveniente de um abatedouro da região Metropolitana de Belo Horizonte. Já como substrato foram utilizados resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário.

O sistema integrado era composto por uma plataforma de metanização de resíduos, uma plataforma de aproveitamento energético de biogás, além de unidades de tratamento e aproveitamento dos subprodutos sólido (lodo) e líquido do tratamento. O reator de metanização deste estudo foi concebido como um digestor de mistura completa, com volume útil de 18,8 m<sup>3</sup>, operado em um único estágio de digestão anaeróbia, em condições controladas de temperatura e pressão (Figura 15). Segundo Ferreira (2015), em condições ideais de operação o sistema apresentou um rendimento de produção de metano de aproximadamente 400 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.tSV<sup>-1</sup>, com concentração de SV ajustada entre 35 e 55 gSV.L<sup>-1</sup> para o substrato.

Figura 15 - Reator de metanização para tratamento de resíduos orgânicos da UFMG



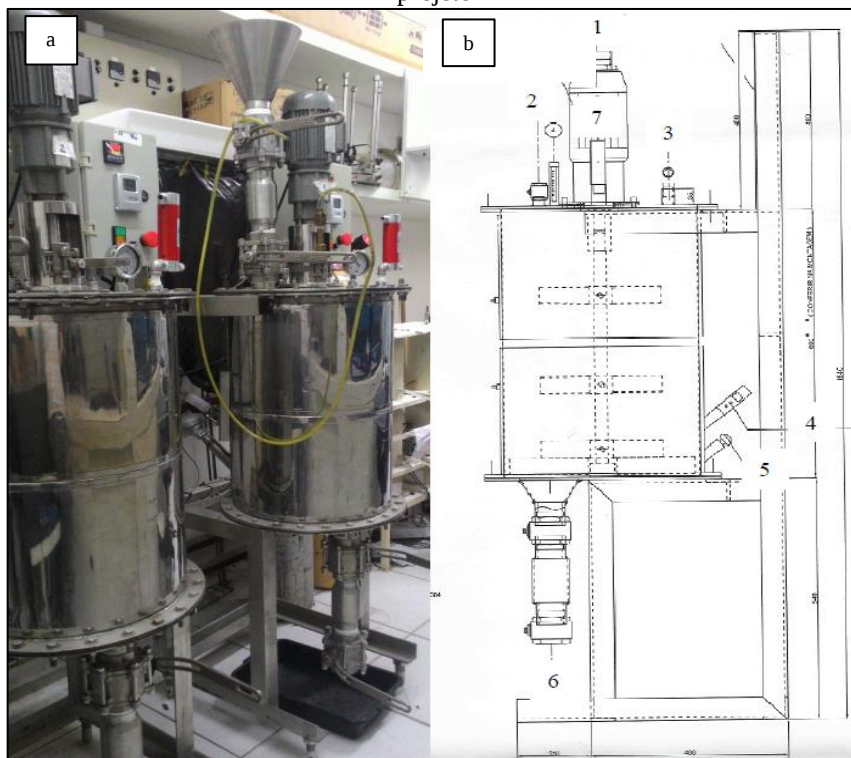
Fonte: Ferreira (2015).

Valença (2017), ao avaliar o potencial de geração de biogás dos resíduos do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Pernambuco (RU-UFPE), utilizou dois reatores em única fase com capacidade de 75 litros cada, ambos em condições controladas, contendo instrumentos de medição, chaves e sistema de proteção elétrica para acionamento das resistências, além de sensor de pH específico para altas pressões, sensor PT-100 para

medição de temperatura e termo-higrômetro digital para umidade, conforme apresentado na Figura 16.

O estudo de Valença (2017) se baseou na codigestão com o resíduo alimentar proveniente do RU-UFPE em alimentação semi-contínua, sendo um reator inoculado com lodo de esgoto e o outro como lodo industrial de vinhaça. Este apresentou resultados mais satisfatórios, atingindo um rendimento máximo na produção de metano por tonelada de resíduo alimentar de  $95,63 \text{ m}^3/\text{ton}$ .

Figura 16 - Reatores piloto de escala intermediária utilizados por Valença (2017): (a) imagem real; (b) croqui de projeto



Fonte: Valença, 2017.

\*Legenda: Em (b), 1: Câmara de alimentação tipo estanque; 2: válvula de purga de gás; 3: válvula de segurança; 4: sensor de pH; 5: sensor de temperatura; 6: Câmara de descarga tipo estanque; manômetro.

Santos (2017) realizou o estudo da biodigestão dos resíduos alimentares do RU-UFPE, utilizando o lodo como inóculo, empregando como metodologia um reator de 200L, construído em galão de plásticos, tubos, conexões e válvulas hidráulicas de 50 mm para entrada e saída de biomassa, conexão metálica para saída do biogás e medidor de vazão de gás.

O gasômetro foi confeccionado em material plástico visando o armazenamento do biogás com capacidade aproximada de  $0,3 \text{ m}^3$ , além de mangueiras e braçadeiras visando a passagem do biogás. A Figura 17 apresenta um detalhamento do reator construído por Santos

(2017). A operação do reator foi iniciada com a adição de 4L de resíduos alimentares diluídos em água e 42L de inóculo. Durante o período de operação do reator, a vazão mínima de alimentação foi de 1 kg por semana e a máxima foi de 48 kg por semana, com a frequência de alimentação variando entre 1 e 3 vezes. Segundo a autora, este reator de operação semi-contínua, mesmo sem possuir sistema de agitação e controle de temperatura apresentou uma produção máxima de 46,5 m<sup>3</sup>biogás/m<sup>3</sup> de resíduos alimentares, com carga orgânica de 0,075 kgSV.dia<sup>-1</sup>.

Figura 17 - Reator piloto em escala intermediária com capacidade de 200 L



Fonte: Santos, 2017.

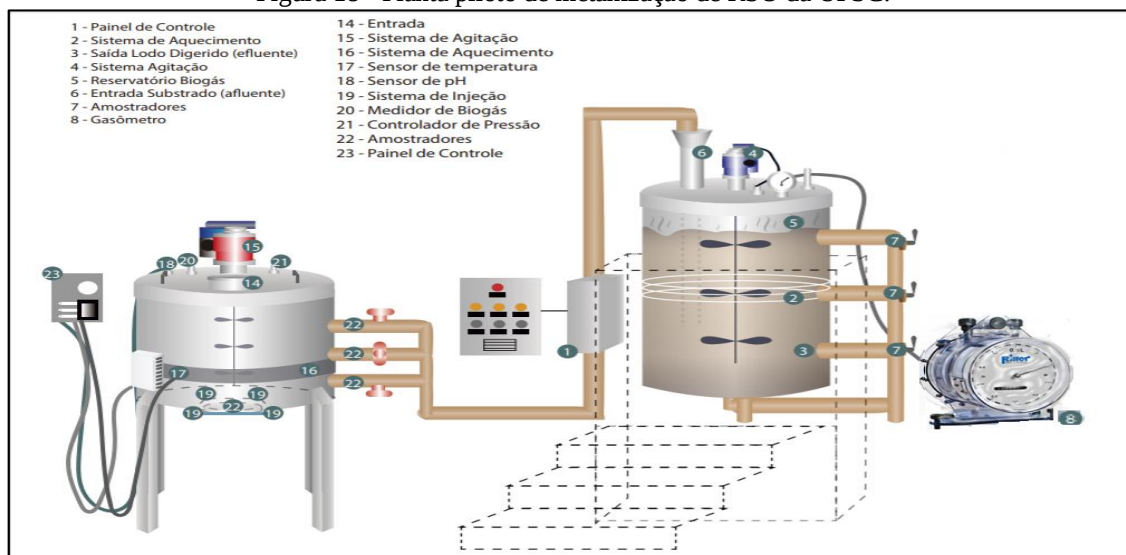
É importante ainda destacar um estudo realizado por pesquisadores da UFSC para tratamento dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da instituição e resíduos da jardinagem, com a codigestão com inóculo de dejetos bovino diluído.

A planta é composta por dois reatores – sendo um com 85L e o outro com 115L –, de aço inoxidável, com sistemas de aquecimento e mistura, atuando em série, separados fisicamente, desenvolvendo as fases acidogênica e metanogênica em cada um, sendo possível aumentar a estabilidade e mitigar as limitações que podem levar ao acúmulo de AGV em reatores anaeróbios, operando em temperatura mesófila de aproximadamente 35°C. A medição do volume de biogás produzido era realizada através de um gasômetro de marca Ritter tipo TG05 (MALINOWSKY, 2021). A Figura 18 apresenta a planta piloto de metanização.

Os reatores foram preenchidos com inóculo e o início da alimentação e das análises foi realizada após a estabilização da produção de biogás dos mesmos. Para o reator acidogênico, o TDH foi de 2 e 3 dias; já para o reator metanogênico, o TDH foi variou entre 3,6 dias e 100 dias. Os resultados obtidos indicaram que os melhores desempenhos foram observados para o

TDH de 2 dias, tanto para a produção de biogás como de metano, com  $0,88 \text{ L}_{\text{biogás}}/\text{gSTV}_{\text{adicionado}}$  e  $0,57 \text{ L}_{\text{metano}}/\text{gSTV}_{\text{adicionado}}$ , respectivamente. A concentração de  $\text{CH}_4$  atingiu média superior a 60%, atingindo o valor máximo de 72% (MALINOWSKY, 2021).

Figura 18 - Planta piloto de metanização de RSO da UFSC.



Fonte: Malinowsky, 2021.

A Tabela 4 apresenta as principais características relacionadas a dimensão e operação dos equipamentos com base na literatura anteriormente apresentada dos biodigestores em escala intermediária.

Tabela 4 - Resumo dos principais parâmetros utilizados em biodigestores em escala intermediária segundo a literatura

| Características dos Resíduos | Volume     | Tipo de Alimentação | Temperatura Média | Agitação Média          | Variáveis Controladas        | Autor          |
|------------------------------|------------|---------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| Resíduos Alimentar           | 75L        | Semi-Contínua       | 37°               | 20 rpm                  | Temperatura e Agitação       | VALENÇA (2017) |
| Resíduos Alimentar           | 200L       | Semi-Contínua       | 30°C              | Sem sistema de agitação | Não há condições controladas | SANTOS (2017)  |
| Resíduo Alimentar            | 85L e 115L | Batelada            | 35°C              | 30 rpm                  | Temperatura e Agitação       | UFSC (2018)    |

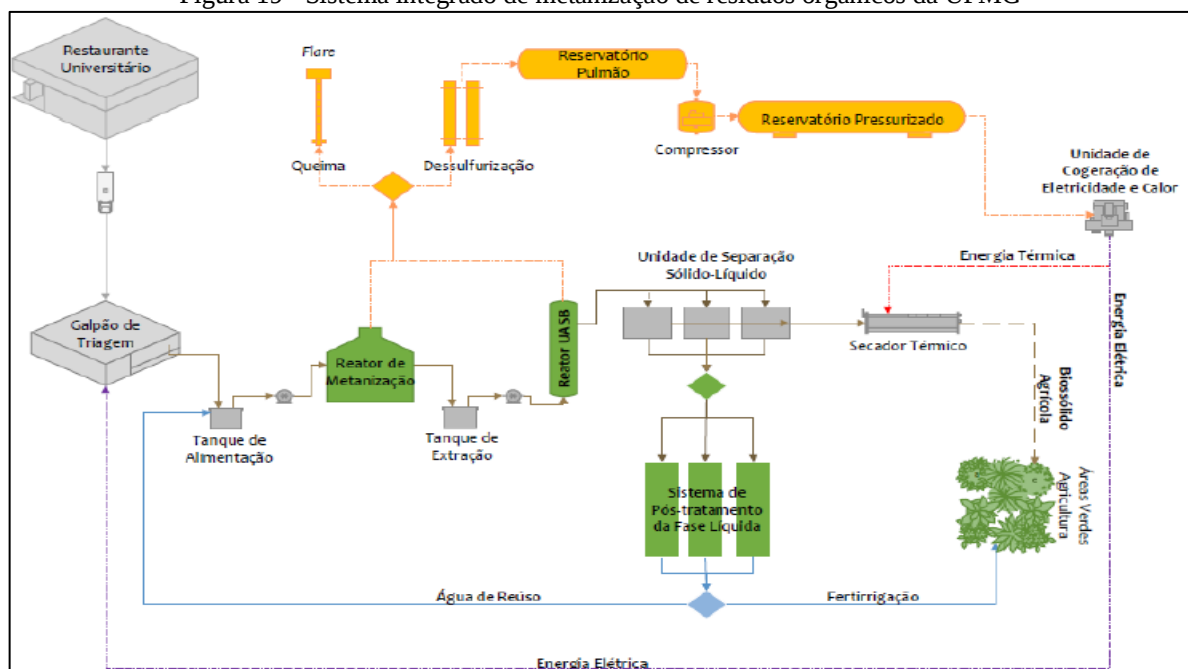
Fonte: A Autora (2023).

### 2.5.3 Biodigestores Anaeróbios em Escala de Campo

Ferreira (2015), realizou o tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento dos subprodutos lodo e biogás através de um sistema composto por uma plataforma de metanização de resíduos (pMethar), que trata e produz biogás e fertilizante a partir das sobras de um restaurante universitário no Campus Pampulha da UFMG, conforme ilustrado na Figura 19. O reator foi projetado para tratamento de 1tonelada de resíduos orgânicos por dia.

O reator de metanização tem volume útil de 18,8 m<sup>3</sup>, controle de medição e pressão, operado em um único estágio de digestão anaeróbia, sob a via úmida de tratamento. Segundo o autor, em condições ideais de operação o sistema apresentou a produção de metano da ordem de 400 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.tSV<sup>-1</sup>, o que pode resultar na produção de 23 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> a partir do tratamento de cerca de 500 kg de resíduos alimentares por dia. Com esse volume diário foi possível gerar em média 2.055 kWh.mês<sup>-1</sup>, o que é suficiente para atender a toda a demanda energética da planta e, com cerca de 1.400 kWh.mês<sup>-1</sup>, excedentes, estariam disponíveis para suprir parte da demanda elétrica de edifícios e iluminação pública da UFMG. A partir dessa iniciativa, foi possível comprovar que na prática é possível reduzir a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários e gerar produtos. Portanto, a biodigestão anaeróbia é uma alternativa viável com relevante aplicabilidade, visando o tratamento e aproveitamento energético desses resíduos alimentares.

Figura 19 - Sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos da UFMG



Fonte: Ferreira (2015).

Pesquisadores da Universidade Estadual de Londrina – UEL também vem realizando um estudo para tratamento de resíduos utilizando como substrato os resíduos do restaurante universitário, do refeitório do hospital universitário e dejetos suínos. Instalados na Fazenda Escola da UEL, o sistema de biodigestão com capacidade de 40m<sup>3</sup> é composto por área de recepção de resíduos, sistema de armazenamento e tratamento do biogás gerado, além do abrigo do grupo gerador de energia elétrica com capacidade de 30kVA.

Bortoloti *et al.* (2023) ao realizarem a operação no reator por 278 dias de forma semicontínua, com agitação mecânica, temperatura mesófila e 40 dias de TRH considerou como positiva a implantação e as condições do sistema, visando a produção de metano para a geração de energia limpa, visto ter obtido uma taxa variando de 0,14 a 2,50 kgVS m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> nas diferentes fases do processo, com um teor de metano variando entre 54,65% e 66,60%.

No Brasil, a primeira planta a utilizar resíduos alimentares e poda de gramas, com inóculo de lodo de esgoto, visando à produção de energia foi implantada no Shopping Camará, localizado na cidade de Camaragibe, na Região Metropolitana do Recife no ano de 2016 (Figura 20). A miniusina possui uma potência instalada de 30 kVa, capacidade de geração de 24 kW/hora durante três horas por dia, suficiente para suprir as necessidades de 12 residências, com expectativa de atender 10% da demanda total de energia do shopping (PERES, 2016).

A unidade conta com duas caixas de alimentação, dois biodigestores com capacidade para 30 m<sup>3</sup> de resíduos sólido, duas caixas de saída, gasômetro e motor gerador. Para o *start* do biodigestor utilizou-se cerca de 7.500 litros de lodo de esgoto. A alimentação diária foi de cerca de 150kg de resíduos, admitindo um TDH de 60 dias. Os resultados obtidos apresentaram percentuais de metano acima de 60%, desejáveis para a geração de energia elétrica (SILVA, 2017).

Figura 20 - Planta de Biodigestão Anaeróbia localizada no Shopping Camará - PE



Fonte: Silva (2017).

Outra planta dimensionada para utilizar resíduos alimentares e poda de gramas juntamente com o inóculo de lodo oriundos de prédios administrativos visando à produção de energia e de biocombustível foi realizada entre a parceria do Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás) com a Itaipu Binacional no ano de 2017. A planta, fabricada em fibra de vidro e isolamento térmico, possui temperatura controlada de 37°C e dois gasômetros flexíveis com capacidade de armazenamento de até 500m<sup>3</sup> (Figura 21). Em termos do biogás, a planta contém o processo de refino, onde são retirados o gás sulfídrico, CO<sub>2</sub> e água. O produto final apresenta 96% de pureza, com características de gás natural. Já o substrato após tratamento é utilizado como biofertilizante nas áreas verdes da Itaipu (ITAIPU, 2017).

Este biodigestor é fundamentado no método de mistura completa e tem como perspectiva o tratamento mensal de 10 toneladas de resíduos alimentares, 30 toneladas de poda de grama, inoculados com 300 mil litros de esgoto. A produção inicial estava estimada em 4 mil m<sup>3</sup> de biometano por mês, o suficiente para o abastecimento de 80 veículos da frota da usina, considerando uma média de 800km/mês de uso médio por veículo. Já em termos do substrato, estima-se a produção de cerca de 300 mil litros de biofertilizantes para a utilização como adubo. Os resultados podem demandar uma diminuição de 4 toneladas de gases causadores do efeito estufa por mês (ITAIPU, 2017). A Figura 21 apresenta a Unidade de Demonstração de Itaipu, operada e monitorada pelo CIBiogás.

Figura 21 - Unidade de Demonstração de Biogás e Biometano de Itaipu



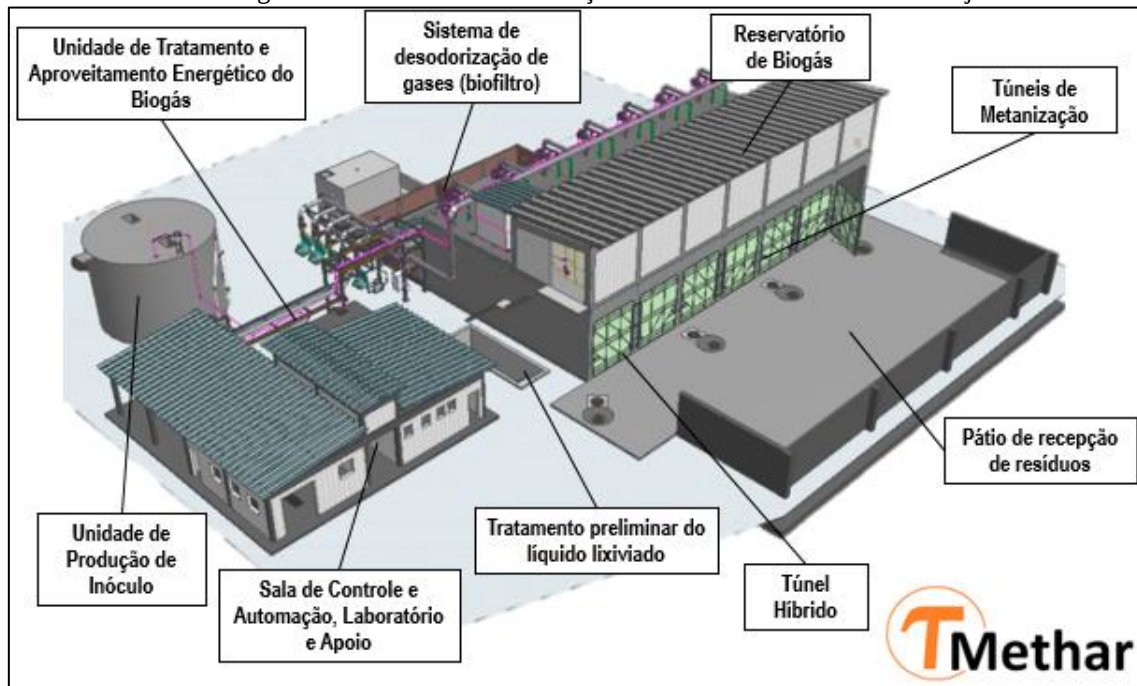
Fonte: CIBiogás (2018).

O Relatório do CIBiogás referente aos meses de janeiro à dezembro do ano de 2018 sobre o funcionamento desta Unidade afirma que foram gerados cerca de 148.046kg de resíduos provenientes dos 5 restaurantes do complexo de Itaipu juntamente com resíduos externos de poda. O tratamento destes resíduos acarretou em 17 mil m<sup>3</sup> de biometano, o que representa cerca de 210 mil km rodados, o que ocasionou em 1.260kg de GEE evitados.

A mais recente unidade de tratamento de resíduos no Brasil está localizada na Estação de Tratamento de Resíduos do Cajú, no Estado do Rio de Janeiro, e é considerada a primeira tecnologia de metanização de RSU da América Latina (Figura 22). O sistema é baseado no conceito mais robusto da atualidade, comumente conhecido como extrasseco, que é considerada a última geração de tecnologia de metanização (PROTEGEER, 2018; COLTURATO, 2018).

Como características básicas, a tecnologia apresenta simplicidade operacional, admite alta quantidade de resíduos diversos e tem capacidade de tratamento estimado entre 50 toneladas/dia de RSU (PROTEGEER, 2018). Segundo Colturato (2018), a produção de biogás estimada é em torno de 4.500 Nm<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>, com uma produção de energia de 150 kW. A energia gerada a partir da combustão do biogás abastece o sistema, além de ter como premissa o abastecimento de casas populares localizadas no entorno da unidade.

Figura 22 - Sistema de Metanização de RSU localizada na ETR - Cajú



Fonte: PROTEGEER (2018).

## 2.6 BALANÇO DE MASSA

A base das observações para a especificação de entradas e saídas de um reator está fundamentada na Lei de Conservação da Massa de Lavoisier, onde em reações químicas para sistemas fechados, a massa dos reagentes é igual a massa dos produtos (FELDER *et al.*, 2008). Desta forma, o balanço de massa permite uma descrição quantitativa dos materiais de entrada, saída, acumulado e geração em um sistema com limites físicos definidos, onde sua expressão básica deverá apresentar tanto o volume de um tanque ou reator como um todo (PINHEIRO, 2006). De maneira geral, o balanço de massa apresenta diversas maneiras como as componentes envolvidas que entram e saem de um sistema (COSSU, 2005).

Segundo Cossu *et al.* (2005), substâncias de particular interesse ambiental que requerem monitoramento constante incluem, entre outras, o carbono e o nitrogênio, ambos associados aos compostos orgânicos presentes nos resíduos, onde a quantidade média de carbono presente em um resíduo municipal europeu é de aproximadamente 20%-25%, distribuído entre as várias categorias orgânicas, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição média expressa em termos de porcentagem de sólidos totais

| <b>Componente</b>                           | <b>%</b> |
|---------------------------------------------|----------|
| <b>Compostos orgânicos</b>                  |          |
| Lignina                                     | 6        |
| Hemicelulose                                | 7        |
| Proteínas                                   | 3        |
| Aditivos de papel (orgânicos + inorgânicos) | 8        |
| Celulose                                    | 16       |
| Hidrocarbonetos                             | 9        |
| Fast, resinas, ceras                        | 2        |
| Plástico                                    | 18       |
| <b>Compostos Inorgânicos</b>                |          |
| Aditivos plásticos                          | 3        |
| Minerais                                    | 13       |
| Cinzas                                      | 4        |
| Substâncias perigosas                       | 1        |
| Metais                                      | 10       |

Fonte: Cossu *et al.* (2005).

No que concerne à mobilidade na composição dos resíduos, podem ser identificadas duas frações orgânicas distintas: (1) concentração não móvel de contaminante nos resíduos e (2) concentração móvel de contaminante nos resíduos. A fração móvel de carbono pode ser realizada através da lixiviação, biodegradação ou outras reações/conversões do sólido para a fase líquida, fase gasosa ou é convertida, nas condições existentes, em uma forma sólida imóvel (COSSU *et al.*, 2005).

Segundo Leite; Povinelli; Vasquez (1997), o balanço de massa pode ser realizado para reatores operando com alimentação contínua, semi-contínua ou em batelada que estejam tratando substratos sólidos, semi-sólidos ou líquidos e é expresso de modo simplificado através da Equação 2.

$$M_E - M_S - M_{AC} = 0 \quad (2)$$

Onde:

$M_E$  = Massa que entra no sistema (kg)

$M_S$  = Massa que sai do sistema (kg)

$M_{AC}$  = Massa acumulada no sistema (kg)

Os procedimentos utilizados para a determinação da massa em substratos de natureza sólida e líquida são diferentes. Assim, Leite; Povinelli; Vasquez (1997) avaliaram o processo de bioestabilização anaeróbia da fração orgânica putrescível de RSU inoculada com rúmen bovino em reatores de batelada através do balanço de massa de três parâmetros: demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais voláteis e nitrogênio total Kjeldal (NTK). O balanço de massa foi aplicado ao sistema para verificar a eficiência de conversão do substrato em biogás, utilizando-se para isso a Equação 3.

$$M_{AP} = M_{AC} + M_{TB} + M_{TP} \quad (3)$$

Onde:

$M_{AP}$  = massa aplicada                       $M_{TB}$  = massa convertida em biogás

$M_{AC}$  = massa acumulada                       $M_{TP}$  = massa convertida em percolado

Considerando que as frações de massas no processo estão submetidas ao mesmo tempo de operação, e que a massa compreende duas frações distintas, ou seja, a massa produzida pelo processo de bioestabilização anaeróbia e a massa convertida em biogás, Leite; Povinelli; Vasquez (1997) realizaram o cálculo da massa de DQO do percolado através da Equação 4.

$$M_{DQO\text{percolado}} = V_{\text{percolado produzido}} \cdot C_{DQO\text{percolado}} \quad (4)$$

A Equação 5 apresenta o cálculo para obtenção da massa de DQO convertida em biogás.

$$M_{DQO\text{transformada}} = M_{DQO\text{afluente}} - M_{DQO\text{acumulada}} - M_{DQO\text{dopercolado}} \quad (5)$$

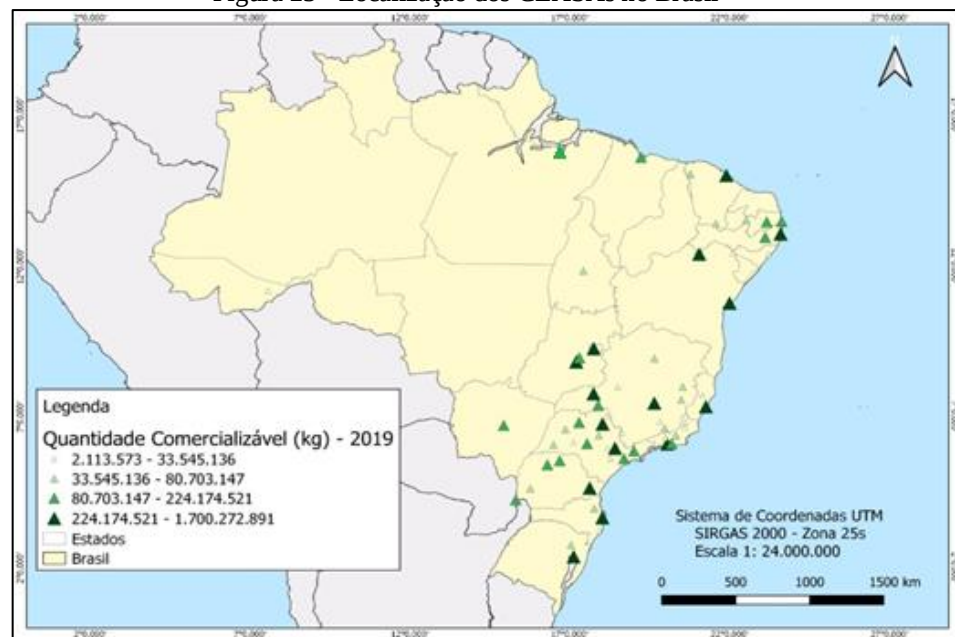
## 2.7 PANORAMA DA GESTÃO DE RESÍDUOS DE CEASAS NO BRASIL

As CEASAS são empresas estatais ou de capital misto que tem como objetivo principal a comercialização de produtos hortifrutigranjeiros. Em geral, essas empresas alugam

seus inúmeros galpões, para empresas privadas na forma de licitação que podem então comercializar seus produtos diretamente com o consumidor final.

O sistema brasileiro das CEASAS é composto por 48 instituições gestoras e por 72 entrepostos distribuídos em 22 unidades da federação. Do total de entrepostos, 50% estão localizados na região Sudeste, 27% no Nordeste, 16% no Sul, 6% no Centro-Oeste e 1% no Norte (QUEIROZ, 2018), conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Localização dos CEASAs no Brasil



Fonte: Jucá *et al* (2022).

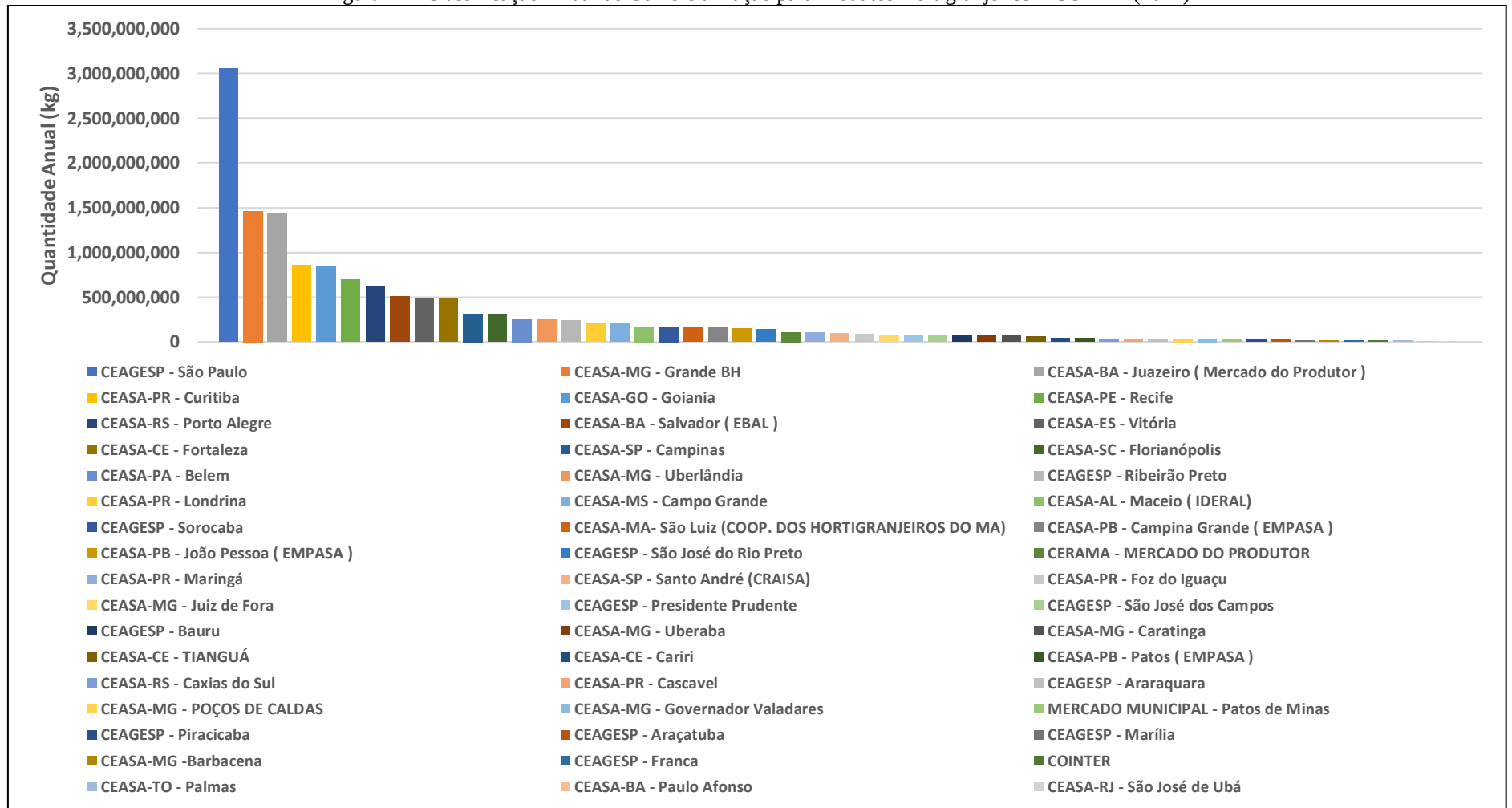
A Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, por meio do Programa Brasileiro de Modernização do Mercado Hortigranjeiro - Prohort, divulga anualmente um estudo de comercialização de produtos hortigranjeiros, onde segundo o relatório, para o ano de 2022, este setor da economia movimentou cerca de 14.466.359 toneladas de produtos hortigranjeiros, estando a CEAGESP-SP em primeiro lugar no que tange a classificação anual de comercialização para produtos hortigranjeiros, e a CEASA/PE - Recife em sexto lugar (CONAB, 2022), como apresentado na Figura 24.

No que concerne à geração de resíduos sólidos urbanos, cerca de 30% do desperdício de alimentos é oriundo das centrais de abastecimento, ou seja, aproximadamente 4,38 milhões de toneladas por ano (IPEA, 2009). Segundo Camara *et al.* (2014), o total de resíduos gerados em um CEASA, utilizando como exemplo os dados da CEAGESP-São Paulo, corresponde a 1,7% do total de produtos comercializados, ou seja, cerca de 90 toneladas por dia, sendo 90% destes materiais compostos por resíduos orgânicos. Desses, 78,82% são destinados para

aterros, e 21,18% do volume de resíduos foram reaproveitados, seja para consumo, reciclagem e compostagem.

Apesar do grande volume de resíduos orgânicos gerados em todos os CEASA'S e do relevante potencial de produção de biogás, até o ano de 2020 foram identificados apenas 4 projetos em obras ou em início de operações envolvendo a biodigestão anaeróbia para tratamento desses resíduos, localizados nas cidades de Curitiba-PR, Porto Alegre – RS, Goiás – GO e Recife – PE (JUCÁ *et al.*, 2022).

Figura 24 - Classificação Anual de Comercialização para Produtos Hortigranjeiros – CONAB (2022)



Fonte: CONAB (2023)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado nesta pesquisa foi realizado em 4 etapas, cada qual constando de atividades específicas, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Etapas e atividades do estudo

| <b>Etapa</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                                   | <b>Atividades</b>                                                                                                                                     | <b>Ensaio</b>           | <b>Quantidade</b> |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Etapa 1      | Estudo da gestão dos resíduos do CEASA/PE - Recife                                                                                 | Levantamento de dados sobre a gestão dos resíduos de frutas, verduras e hortaliças gerados no CEASA/PE - Recife                                       | Composição Gravimétrica | 48                |
|              |                                                                                                                                    | Definição dos galpões com maior geração de resíduos                                                                                                   |                         |                   |
|              |                                                                                                                                    | Caracterizar os resíduos dos galpões através da composição gravimétrica                                                                               |                         |                   |
|              |                                                                                                                                    | Avaliar a frequência de aparecimento dos resíduos                                                                                                     |                         |                   |
| Etapa 2      | Avaliar a geração de biogás dos resíduos de frutas e verduras/hortaliças selecionados em escala de laboratório, com correção do pH | Realizar coleta e caracterização físico-química dos resíduos de frutas, verduras e hortaliças <i>in natura</i> e dos inóculos de lodo e rúmen bovino; | pH                      | 123               |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | Umidade                 | 15                |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | Sólidos Voláteis        | 15                |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | Análise elementar       | 15                |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | Teor de Fibras          | 15                |
|              |                                                                                                                                    | Avaliar a produção e a taxa de geração de biogás através de ensaios de BMP utilizando o lodo proveniente de ETE e rúmen bovino como inóculo           | Ensaio de BMP           | 54                |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | pH                      | 54                |
|              |                                                                                                                                    |                                                                                                                                                       | Condutividade e         | 54                |
|              |                                                                                                                                    | Identificar a determinação da constante de decaimento e o                                                                                             | Não se aplica           |                   |

|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        |                  |     |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----|
|                      |                                                                            | potencial máximo de geração de biogás                                                                                                                  |                  |     |
| Etapa 3              | Projetar, implantar e operar uma planta experimental de digestão anaeróbia | Participação de reuniões técnico-científicas com os pesquisadores do GRS e da FINEP visando identificar parâmetros para projetar a planta experimental | 10 reuniões      |     |
|                      |                                                                            | Operação da planta experimental com os resíduos do CEASA/PE - Recife                                                                                   | 1 ano e 2 meses  |     |
|                      |                                                                            | Monitoramento da planta experimental com os resíduos provenientes do CEASA/PE - Recife                                                                 | pH               | 120 |
|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        | Umidade          | 120 |
|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        | Série de Sólidos | 120 |
|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        | DQO              | 120 |
|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        | Alcalinidade     | 120 |
|                      |                                                                            |                                                                                                                                                        | AGV              | 120 |
| Composição do biogás | 72                                                                         |                                                                                                                                                        |                  |     |

Fonte: A Autora (2023).

### 3.1 GESTÃO DOS RESÍDUOS DO CEASA/PE – RECIFE

Este subtópico da metodologia apresenta dados gerais de estrutura física e operacional do Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco – CEASA/PE – Recife.

#### 3.1.1 Área de estudo e mapeamento da quantidade de resíduos descartados

A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco – CEASA-PE, localizado no município de Recife - PE. Segundo o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) do estabelecimento, desenvolvido no ano de 2017, o CEASA/PE - Recife é a maior central de abastecimento do Norte/Nordeste em termos de volume de vendas, apresentando uma comercialização em torno de 90.000 t/mês, com uma movimentação de cerca de 65.000 pessoas/dia. Mensalmente, são gerados cerca de 1.100 t de resíduos sólidos,

dos quais, 90% destes são de resíduos orgânicos do tipo hortaliças, frutas e verduras, tendo em vista a magnitude da comercialização destes produtos distribuídos na mesma. A Tabela 7 apresenta alguns dados da infraestrutura física e operacional do CEASA/PE – Recife.

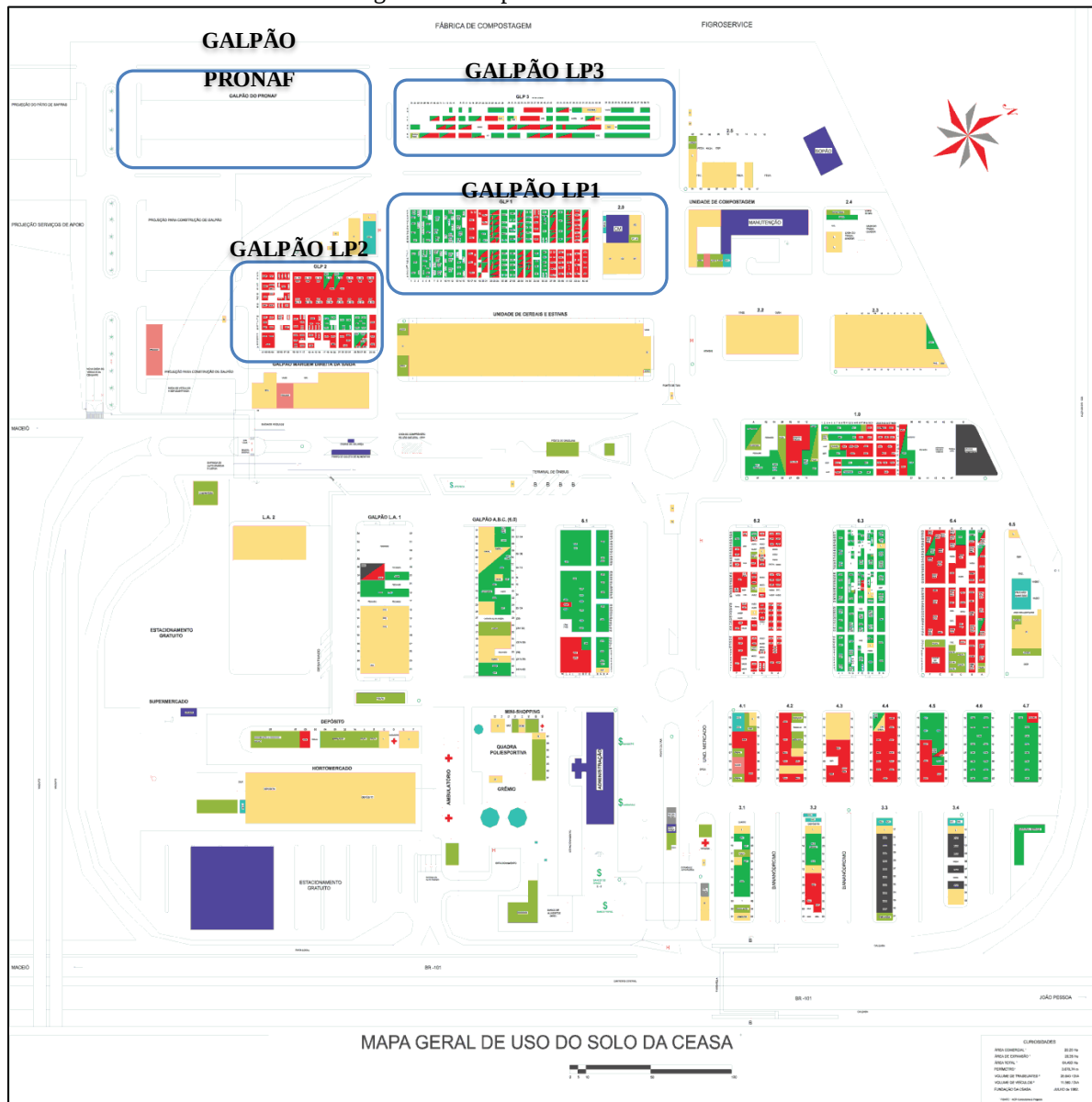
Tabela 7 - Dados gerais da infraestrutura física e operacional do CEASA/PE - Recife

| <b>DESCRIÇÃO</b>                              | <b>VALORES</b>        |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Área Total</b>                             | 580.000m <sup>2</sup> |
| <b>Área Construída</b>                        | 325.000m <sup>2</sup> |
| <b>Permissionários Fixos</b>                  | 1.350                 |
| <b>Permissionários Não Fixos (Produtores)</b> | 500                   |
| <b>Galpões de Comercialização</b>             | 56                    |
| <b>Instituições Financeiras (Bancos)</b>      | 03                    |
| <b>Média de Comercialização</b>               | 90.000 t/mês          |
| <b>Valor Comercial Médio</b>                  | R\$ 440 milhões/mês   |
| <b>Quantidade Média de Resíduos</b>           | 1.100 t/mês           |
| <b>Fluxo de Pessoas Diariamente</b>           | 70.000/dia            |
| <b>Movimentação de Veículos</b>               | 14.200/dia            |
| <b>Taxa de crescimento Anual</b>              | 9%                    |

Fonte: CEASA/PE - Recife (2023)

Estudos de campo iniciais indicaram que quatro (04) dos cinquenta e seis (56) galpões de comercialização distribuídos no CEASA/PE - Recife apresentam uma maior geração de resíduos: LP1 (Livre Produtor 1), LP2 (Livre Produtor 2), LP3 (Livre Produtor 3) e PRONAF (Programa Nacional de Alimentação Familiar). A Figura 25 apresenta um mapa geral do estabelecimento, com destaque para os galpões estudados nesta pesquisa.

Figura 25 - Mapa Geral do CEASA/PE – Recife



\*Legenda: LP1: Livre produtor 1; LP2: Livre produtor 2; LP3: Livre produtor 3; PRONAF: Programa Nacional de Agricultura Familiar

### 3.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CEASA/PE – RECIFE

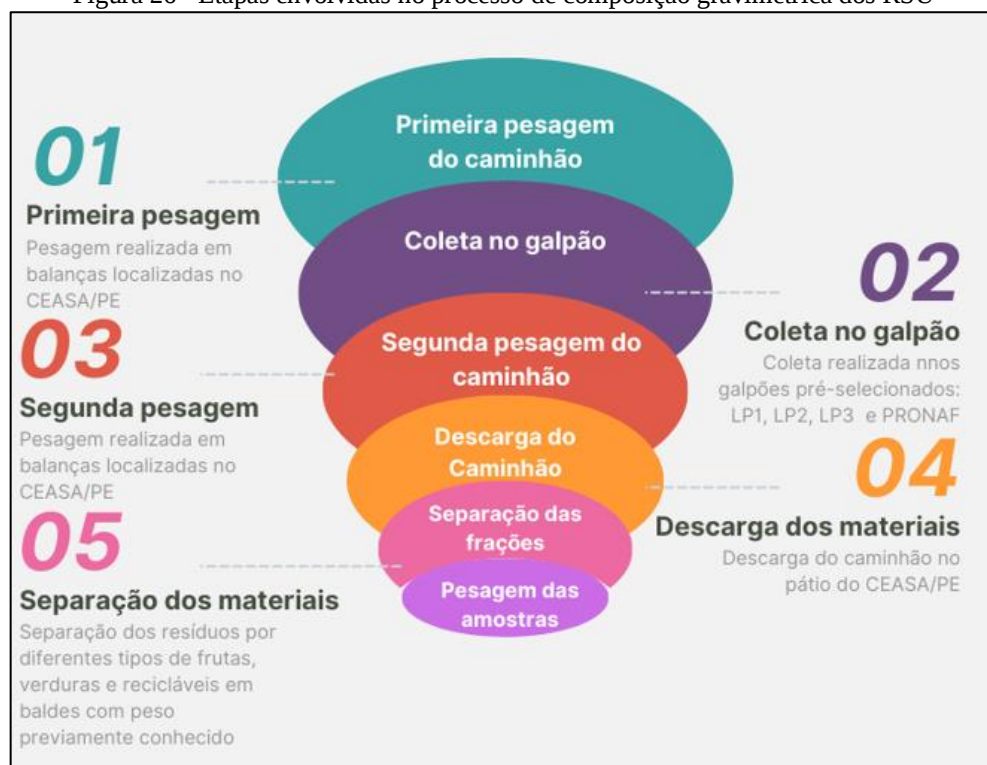
A análise de composição gravimétrica possibilita determinar o percentual dos diferentes materiais que compõem os resíduos em termos de massa, visando à diversificação de seu tratamento, através da valorização dos materiais, em forma de reciclagem, compostagem e de seu potencial energético. Apesar de o maior percentual de resíduos do CEASA/PE - Recife ser composto por materiais orgânicos do tipo hortaliças, frutas e verduras, a análise foi realizada com o intuito de identificar quais materiais tinham um maior

percentual de descarte. Para tanto, foram realizadas composições mensais durante um período de 12 meses nos diferentes galpões estudados.

Como mencionado anteriormente, através de estudos de campo, observou-se que os galpões LP1, LP2, LP3 e PRONAF apresentavam o maior comércio de diferentes frutas e verduras, além dos maiores índices de descartes no CEASA/PE - Recife, o que foi determinante para a escolha do estudo da composição gravimétrica. A análise foi realizada entre os meses de agosto de 2018 a agosto de 2019, comumente nas quintas-feiras e nas sextas-feiras de cada mês, visto que esses dias possuíam um maior fluxo comercial no local.

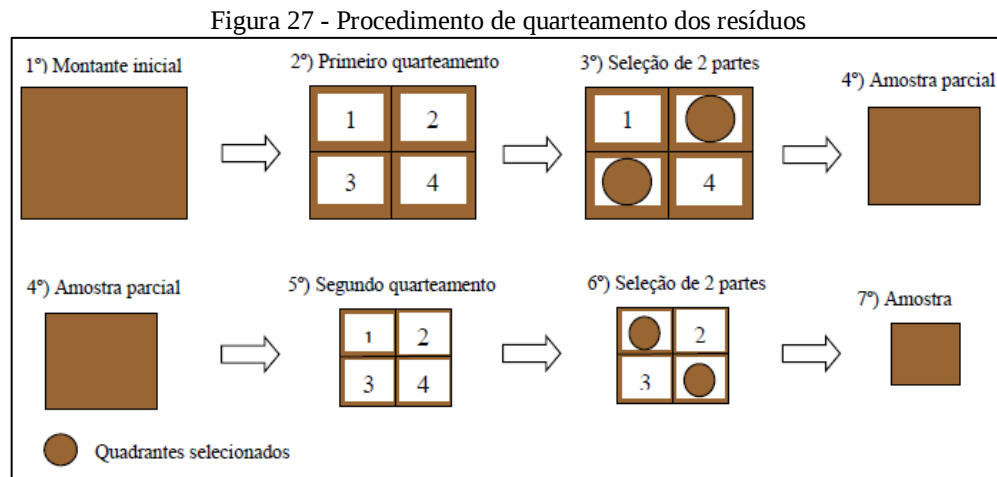
Após coleta realizada através de caminhões compactadores, era realizada a pesagem na balança localizada no próprio CEASA/PE - Recife. Os resíduos foram dispostos em um pátio no estabelecimento, onde foi possível realizar a triagem do material de forma manual. O método utilizado foi adaptado como base nas recomendações da ABNT NBR 10007:2004, que consiste no quarteamento da amostra e análise do material para este tipo de estudo. O alto percentual identificado de materiais do tipo hortaliças em alguns galpões permitia a triagem completa da amostra coletada, que variou entre 300kg e 1.000kg de resíduos triados em cada ensaio. A Figura 26 apresenta as etapas gerais envolvidas neste processo.

Figura 26 - Etapas envolvidas no processo de composição gravimétrica dos RSU



Fonte: Adaptado de Mariano *et al.* (2007).

O procedimento de quartearmento foi realizado em amostras com cerca de 1 tonelada, onde a massa de resíduos foi inicialmente dividida em quatro partes iguais, sendo selecionadas duas para nova homogeneização e duas para descarte. Após nova separação das partes homogeneizadas, foi realizado um novo quartearmento, onde aproximadamente 200kg foram selecionados para triagem (Figura 27).



Fonte: Jucá *et al.* (2020)

A Figura 28 apresenta as etapas realizadas no CEASA/PE - Recife referentes às análises de composição gravimétrica, desde a coleta nos diferentes galpões até a pesagem das amostras após triagem manual.

Figura 28 - Etapas desenvolvidas para a realização da composição gravimétrica dos resíduos de frutas e verduras do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

\*Legenda: (a) Coleta dos resíduos no caminhão; (b) Resíduos dispostos no caminhão; (c) Descarga dos resíduos no pátio de separação; (d) Triagem dos resíduos; (e) Segregação dos resíduos

### 3.3 ENSAIOS ANALÍTICOS PARA AVALIAÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CEASA/PE – RECIFE

O estudo para avaliação da biodegradação utilizou como substrato os resíduos provenientes do CEASA/PE - Recife e dois diferentes tipos de inóculos: (1) o lodo anaeróbio proveniente do reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) da Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira, localizada no bairro da Mangueira, na cidade do Recife-PE (Figura 29) e (2) o rúmem bovino, proveniente do Abatedouro Regional de Paudalho – PE, que atualmente é administrado pelo CEASA/PE – Recife. As amostras foram coletadas em frascos de polietileno com capacidade de 5L e armazenadas a uma temperatura de 4°C.

Figura 29 - Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira



Fonte: Google Earth (2023).

O ensaio utilizado foi o de Potencial Bioquímico do Metano, comumente chamado de Ensaio de BMP. Esta técnica é geralmente realizada em pequenos reatores de borossilicato, que possui duas válvulas para passagem de nitrogênio, com volume de 250 mL, em batelada e possui acoplado ao sistema um manômetro de 1kgf/cm<sup>2</sup>, com escala de 0,01kgf/cm<sup>2</sup> e 0,02kgf/cm<sup>2</sup> que permite a medição do volume de biogás gerado. A duração do experimento foi de 133 dias.

Apesar de atualmente este ensaio possuir diferentes adaptações e variadas formas de realização em termos da quantidade de resíduos, tamanho das partículas, tempo de realização do ensaio, temperatura, dentre outros aspectos (OWEN *et al.*, 1979; OWENS; CHYNOWETH, 1993; ADANI *et al.*, 2001; HARRIES *et al.*, 2001; HANSEN *et al.*, 2004;

ALVES, 2008; YAZDANI, 2010; FIRMO, 2013), este trabalho realizou adaptações com base em vários métodos (HASEN *et al.*, 2004; ALVES, 2008; MELO, 2010; FIRMO, 2013; BRITO, 2015; LUCENA, 2016; VALENÇA, 2017; SANTOS, 2019).

### 3.3.1 Detalhamento do Ensaio de BMP – Configuração Tradicional

A concepção do ensaio foi realizada visando identificar a influência do comportamento dos diferentes inóculos utilizados para dois objetivos principais: determinação da geração de gases por diferentes produtos hortifrutigranjeiros provenientes dos quatro galpões estudados no CEASA/PE - Recife e avaliar o comportamento da sinergia dos resíduos com inóculos diferentes. Para tanto, o ensaio (Figura 30) foi executado seguindo cinco etapas: (1) trituração dos resíduos (2) teste de vedação dos frascos; (3) ensaio de BMP com preenchimento dos biorreatores com diferentes inóculos e substratos, circulação e incubação em temperatura constante; (4) monitoramento, coleta e análise do biogás; (5) Finalização do experimento (ALVES, 2008; MELO, 2010; FIRMO, 2013; BRITO 2015; LUCENA, 2016; VALENÇA 2017; SANTOS, 2019).

Figura 30 - Biorreatores com diferentes inóculos e substratos em temperatura ambiente

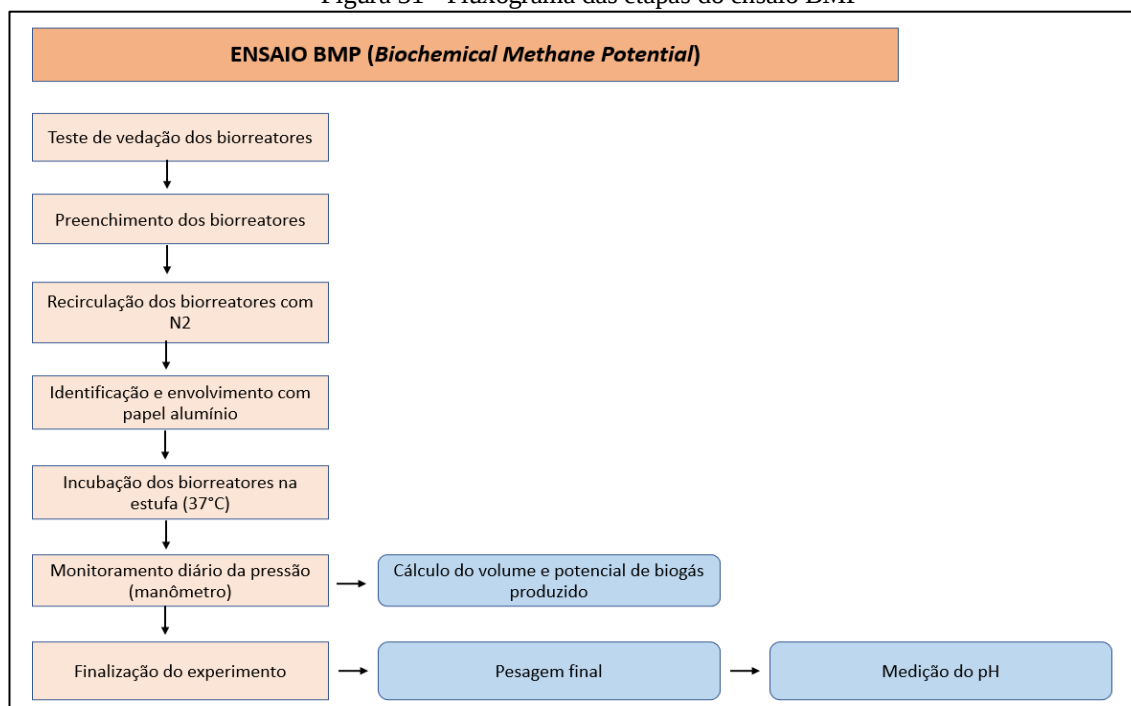


Fonte: A Autora (2023).

Durante a montagem do ensaio, foram realizadas aferições de pH em cada reator já montado, visando a correção dos mesmos na faixa entre 6,5 e 7,5, visto ser a ideal para as *archeas metanogênicas*. Em situações onde o pH encontrava-se menor que esta faixa, foram

realizadas correções com NaOH 30% (VALENÇA, 2017). Visando garantir a manutenção do pH, foi necessário ainda realizar um ajuste com 1,5g de bicarbonato de sódio, para um volume de 50 mL. Lucena (2016) apresenta um fluxograma com um resumo detalhado do ensaio BMP, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma das etapas do ensaio BMP



Fonte: Adaptado de Lucena (2016)

Com base nos resultados obtidos a partir da composição dos resíduos, foram selecionados os cinco resíduos de frutas e verduras de maior percentual e frequência de aparecimento, sendo estes utilizados como substrato. A Tabela 8 apresenta as diferentes configurações realizadas para a obtenção do potencial de geração de biogás através do ensaio de BMP. Para tanto, é importante destacar que o ensaio foi realizado em triplicata, visando garantir a confiabilidade dos dados gerados.

O monitoramento foi realizado em triplicata através da leitura diária da pressão interna dos biorreatores, através do manômetro. Os valores das pressões, permitiram o cálculo do volume acumulado (NmL) e os valores referentes a taxa de geração diária (NmL/dia) com base nas Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP.

Tabela 8 - Diferentes configurações utilizadas para os ensaios de BMP

| <b>Configurações</b> | <b>Composição</b>    | <b>Massa adicionada (g)</b> | <b>Headspace (ml)</b> |
|----------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| <b>BMP 1</b>         | Lodo                 | 50                          | 200                   |
|                      | Resíduo              | 5                           |                       |
|                      | Bicarbonato de sódio | 1,5                         |                       |
| <b>BMP 2</b>         | Rúmen                | 50                          | 200                   |
|                      | Resíduo              | 5                           |                       |
|                      | Bicarbonato de Sódio | 1,5                         |                       |
| <b>BMP 3</b>         | Lodo                 | 25                          | 200                   |
|                      | Rúmen                | 25                          |                       |
|                      | Resíduo              | 5                           |                       |
|                      | Bicarbonato          | 1,5                         |                       |
| <b>BRANCO 1</b>      | Lodo                 | 50                          | 200                   |
| <b>BRANCO 2</b>      | Rúmen                | 50                          | 200                   |

Fonte: A Autora (2023).

As configurações analisadas e suas respectivas siglas estão descritas conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Siglas e diferentes configurações utilizadas para os ensaios de BMP

| <b>SIGLA</b>     | <b>CONFIGURAÇÕES</b>                   |
|------------------|----------------------------------------|
| <b>LE</b>        | Lodo de ETE                            |
| <b>RB</b>        | Rúmen Bovino                           |
| <b>LE + RB</b>   | Lodo de ETE + Rúmen Bovino             |
| <b>TOM + LE</b>  | Tomate + Lodo de ETE                   |
| <b>TOM + RB</b>  | Tomate + Rúmen Bovino                  |
| <b>TOM LE+RB</b> | Tomate + Lodo de ETE + Rúmen Bovino    |
| <b>LAR + LE</b>  | Laranja + Lodo de ETE                  |
| <b>LAR + RB</b>  | Laranja + Rúmen Bovino                 |
| <b>LAR LE+RB</b> | Laranja + Lodo de ETE + Rúmen Bovino   |
| <b>BJL + LE</b>  | Berinjela + Lodo de ETE                |
| <b>BJL + RB</b>  | Berinjela + Rúmen Bovino               |
| <b>BJL LE+RB</b> | Berinjela + Lodo de ETE + Rúmen Bovino |
| <b>PMT + LE</b>  | Pimentão + Lodo de ETE                 |

|                  |                                       |
|------------------|---------------------------------------|
| <b>PMT + RB</b>  | Pimentão + Rúmen Bovino               |
| <b>PMT LE+RB</b> | Pimentão + Lodo de ETE + Rúmen Bovino |
| <b>FLS LE</b>    | Folhosos + Lodo de ETE                |
| <b>FLS RB</b>    | Folhosos + Rúmen Bovino               |
| <b>FLS LE+RB</b> | Folhosos + Lodo de ETE + Rúmen Bovino |

Fonte: A Autora (2023).

### 3.3.2 Cálculo do Volume do Biogás Gerado

Com base nas leituras diárias de pressão dos biorreatores, foi realizado o cálculo do volume de biogás gerado através do método indicado por Ivanova *et al.* (2008) e seguido por Firmo (2013), conforme definido na Equação 6.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (6)$$

Onde:

$P_1$ : pressão inicial

$V_1$ : volume inicial

$P_2$ : pressão final

$V_2$ : volume final

Considerando que o biogás gerado foi acumulado no volume do headspace, tem-se então a Equação 7.

$$(p_{atm} + \Delta P) \cdot V_{hs} = p_{atm} \cdot (V_{hs} + V_g) \quad (7)$$

Onde:

$p_{atm}$ : pressão atmosférica em mbar

$V_{hs}$ : volume de headspace

$\Delta P$ : aumento de pressão em mbar

$V_g$ : volume do biogás gerado

Uma adaptação realizada por Firmo (2013), baseada em Ivanova *et al.* (2008), é apresentada na Equação 8, que priorizou a correção do volume medido para as condições de gás seco conforme a CNTP, com temperatura e pressão ambiente e valores de pressão de vapor ( $p_w$ ), sendo esta considerada como a medida da pressão parcial de valor na atmosfera e calculada de acordo com a temperatura ambiente, sendo a temperatura interna do biorreator (T) correspondente de forma teórica a 37 °C.

(8)

$$p_w = 0,61121 \cdot e^{\left(\frac{15,502 \cdot T}{240,97 + T}\right)}$$

As medidas de volume de biogás obtidos nos experimentos são padronizados nas condições da CNTP através da Equação 9.

(9)

$$V'_g = V_g \cdot \frac{p_{atm}}{1013} \cdot \frac{273,2}{273,2 + T} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_w}{p_{atm}}\right)\right)$$

Onde:

$p_w$  = pressão de vapor

$p_{atm}$  = pressão atmosférica

$V_g$  = volume de biogás gerado nas CNTP

$V'_g$  = volume de biogás medido na temperatura do ensaio

Os dados de pressão atmosférica foram obtidos através de consulta ao site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (<https://portal.inmet.gov.br/>), através das estações automáticas de medição (ALVES, 2008; MELO, 2010; FIRMO, 2013).

### 3.3.3 Ajustes de curvas de degradação

Visando identificar a cinética de produção de biogás, bem como a compreensão do processo de biodegradação anaeróbia, foram utilizados modelos matemáticos. Para tanto, utilizou-se o Software Origin Pro 8.0, onde os resultados de biogás acumulado obtidos de forma experimental foram aproximados através dos seguintes modelos:

#### (1) Modelo de Primeira Ordem

$$y(t) = y_m (1 - \exp(-k \cdot t)) \quad (10)$$

#### (2) Modelo Logístico modificado

$$y(t) = \frac{y_m}{1 + \exp\left(\frac{4 \cdot \mu}{y_m} (\lambda - t) + 2\right)} \quad (11)$$

#### (3) Modelo Cinético de Gompertz modificado

$$y(t) = y_m \cdot \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu \cdot e}{y_m} (\lambda - t) + 1\right)\right) \quad (12)$$

#### (4) Modelo de Cone

$$y(t) = \frac{y_m}{1 + (k_{hyd} \cdot t)^{-n}} \quad (13)$$

#### (5) Modelo de Fitzhugh

$$y(t) = y_m (1 - \exp(-k \cdot t)^n) \quad (14)$$

Onde:

y (t): produção acumulada de biogás (NmL/gSV);

t: tempo (dias);

k: constante de degradação (dia<sup>-1</sup>);

y<sub>m</sub>: produção máxima de biogás (NmL/gSV);

μ: taxa máxima de produção de biogás (NmL/dia);

λ: fase lag (dias).

#### 3.3.4 Análise Estatística

Para avaliar os níveis de similaridade em termos de parâmetros de caracterização físico-química, potencial de geração de biogás (NmL/gS) e taxas de produção de biogás (NmL/dia), foi aplicado Análise de agrupamento (Cluster) com o auxílio do software Minitab.

#### 3.3.5 Ensaios Analíticos

Ensaios analíticos de umidade e sólidos voláteis foram realizados, utilizando os resíduos advindos do CEASA/PE - Recife, do lodo da ETE Mangueira e do rúmen do Abatedouro de Paudalho. O Quadro 4 sumariza os parâmetros pesquisados, bem como os métodos de análise.

A determinação da umidade foi realizada considerando o método do peso úmido, baseado na NBR 6457 (1986). Inicialmente as amostras preparadas foram submetidas a 65°C até verificada a estabilização, conforme determinação da norma. No entanto, após 04 (quatro) dias de análise, constatou-se a presença de fungos nas amostras, o que demandou ajustes para garantir a precisão dos resultados.

Quadro 4 - Parâmetros referentes à caracterização química das amostras

| <b>Parâmetro</b>                                  | <b>Metodologia</b>               | <b>Equipamento</b>                                             |
|---------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Umidade                                           | Adaptado de NBR 6457 (1986)      | Estufa Te-393/1-Mp                                             |
| pH                                                | Potenciométrico                  | pHmetro Digimed DM23                                           |
| Condutividade                                     | Condutimétrico                   | Condutivímetro Digimed DM32                                    |
| Alcalinidade                                      | Titulométrica, Kapp (1984)       | Agitador magnético e pHmetro Digimed DM23                      |
| DQO                                               | Espectrofotométrica SMEWW (1995) | Espectrofotômetro Genesys 30                                   |
| ST, STV e STF                                     | WHO (1978)                       | Estufa Te – 393/1-Mp e Mufla EDG 3000                          |
| Análise Elementar                                 | -                                | Analizador elementar, Carlo-Erba – Instruments, modelo EA 1110 |
| Teor de Fibras (celulose, hemicelulose e lignina) | Van Soest (1994)                 | Determinador de fibras TE-149- Tecnal                          |

Fonte: A Autora (2023).

De Lima *et al.* (2002) e Valença (2017), comprovaram que a realização do ensaio de umidade a 105°C por 24hs não apresentou alterações na carga orgânica presente na amostra, quando comparado a temperatura de 65°C. Assim, após o ajuste na temperatura, ou seja, amostras a 105°C durante um período de 24hs, as amostras foram novamente submetidas à estufa a temperatura de 65°C, até a verificação da estabilização do material, exceto para os resíduos de folhosos/hortaliças que foi mantido o método inicial. Ressalta-se que, o procedimento foi realizado em triplicata e pesados diariamente visando verificar a estabilização. A Figura 32 apresenta o ensaio do teor de umidade.

Figura 32 - Ensaio do teor de umidade dos resíduos de frutas e verduras provenientes do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

#### 3.4 ESTUDO DOS BIODIGESTORES ANAERÓBIOS EM ESCALA PILOTO: PROJETO E IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DO CEASA/PE

Como parte integrante desta pesquisa, foi desenvolvido juntamente com pesquisadores do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS/UFPE) e do projeto FINEP intitulado “Desenvolvimento de Soluções Tecnológicas a partir do Biogás Produzido em Sistemas de Tratamento de Esgotos e Aterros Sanitários para a Geração de Energia Elétrica” uma planta de biodigestão anaeróbia com a finalidade de avaliar o desempenho da tecnologia para a geração de biogás a partir dos resíduos tratados, o aproveitamento energético, a redução das emissões, o aproveitamento do digestato e o conhecimento dos parâmetros de projeto e operação que subsidie a elaboração de um futuro projeto em escala superior.

A unidade foi implantada e está sendo operada nas dependências do CEASA/PE - Recife. O projeto foi idealizado com dois tanques objetivando a realização da fase de pré-tratamento para controle do pH e um tanque para a metanização, trabalhando continuamente. Neste tópico serão apresentadas as etapas que compõem o biodigestor: planejamento, implantação, operação e monitoramento.

### 3.4.1 Planejamento do Biodigestor em Escala Piloto

A estruturação e definição do biodigestor em escala piloto se basearam nos resultados das pesquisas desenvolvidas em laboratório pelos pesquisadores do GRS, além de visitas técnicas, dados de literatura e dos recursos financeiros para a montagem do equipamento.

Assim, o sistema de biodigestão foi dimensionado com capacidade total de 20 m<sup>3</sup>, em condições controladas, mantendo um *headspace* de 20% do volume total quando em operação, conforme estudos realizados por Firmo (2013), Ferreira (2015) e Valença (2017).

O cálculo da capacidade diária de alimentação foi determinado em função da densidade mínima considerada (0,6 ton/m<sup>3</sup>). Assim, a capacidade de alimentação para a unidade de digestão foi calculada em 0,6 ton/dia. Esse valor é utilizado como margem para a alimentação diária do biodigestor.

Em função do volume útil do reator e da carga orgânica aplicada, o TDH médio foi definido entre 20 e 30 dias, visto que altas cargas orgânicas e baixos TDH favorecem as bactérias acidogênicas; já as bactérias metanogênicas, são favorecidas por alto TDH e baixa carga orgânica. Chernicharo (2007) afirma que é importante o TDH elevado em digestores de lodo, visando aumentar o rendimento de metano nos reatores. Paudel *et al.* (2017) ao avaliar um sistema de dois estágios, em condições mesofílicas (37 °C) obtiveram um TDH ótimo entre 8h e 20 dias na fase metanogênica para máxima produção de metano.

A estimativa do potencial de geração máxima de metano foi calculada com base nos resultados obtidos em laboratório por Valença (2017), que obteve uma taxa de 10m<sup>3</sup>/tonelada de resíduos alimentares em reatores de 75 litros durante um período de 100 dias. Assim, considerando uma conversão de 70% de metano, e um potencial de geração de metano máximo de 300 m<sup>3</sup>/toneladas, estima-se para o sistema de biodigestão em escala piloto um potencial de aproximadamente 210m<sup>3</sup>/tonelada.

Considerando uma umidade de 85%, uma capacidade de alimentação de 0,6 tonelada/dia e um potencial de geração de metano de 210 m<sup>3</sup>/tonelada, a geração de metano para resíduos secos na condição de BMP foi estimada em 18,9m<sup>3</sup>/dia. Já em condição contínua, a geração considerando uma eficiência de 100% foi de 36,45 m<sup>3</sup>/dia.

A Tabela 9 apresenta os principais parâmetros utilizados como base para o planejamento e a confecção do biodigestor.

Tabela 9 - Principais parâmetros utilizados como base de cálculo no projeto do sistema de biodigestão em escala piloto instalado no CEASA/PE – Recife

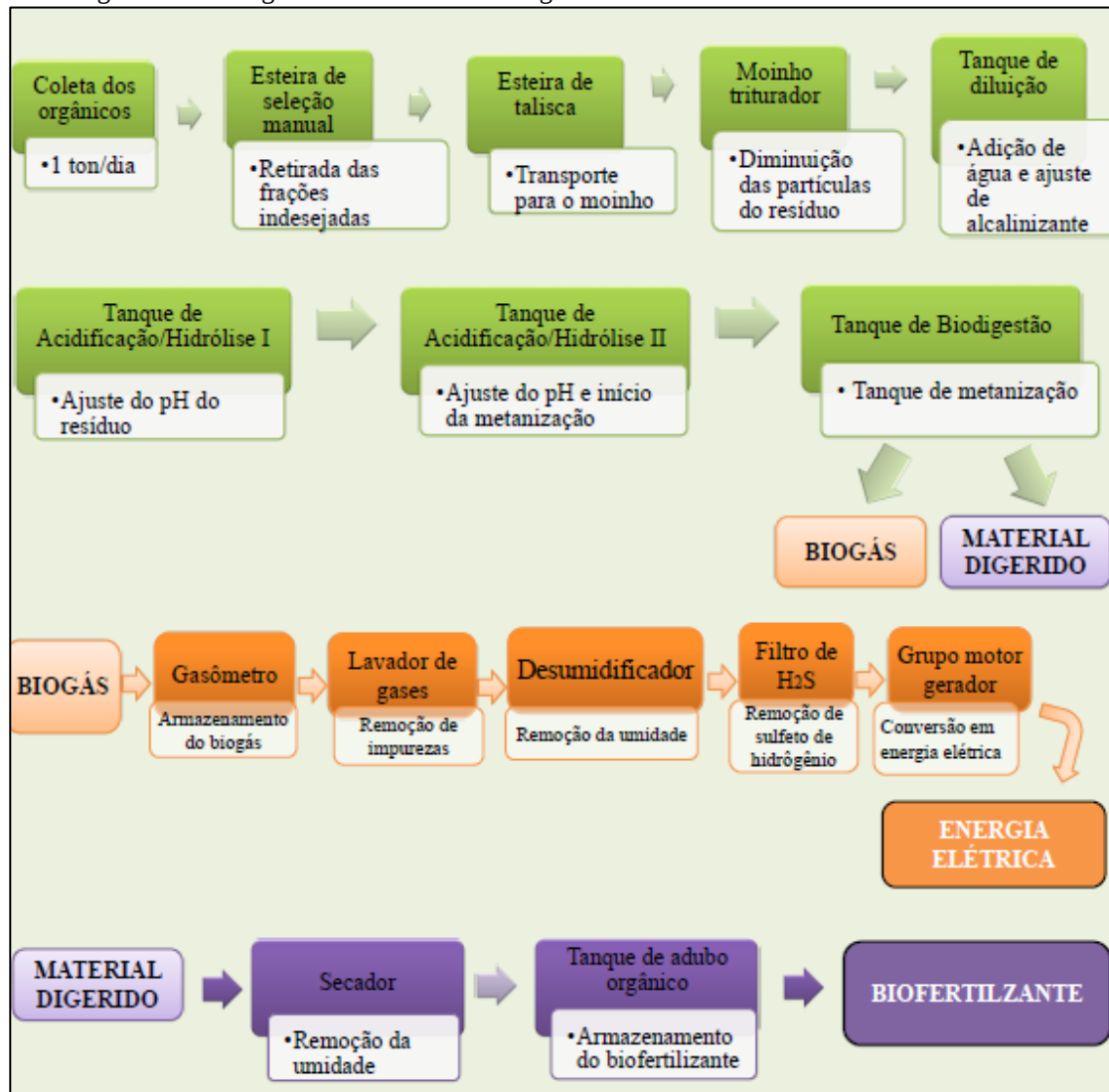
| <b>CÁLCULOS - BIODIGESTOR PILOTO</b>                       |            |                         |
|------------------------------------------------------------|------------|-------------------------|
| Capacidade total da unidade de digestão                    | 20         | m <sup>3</sup>          |
| Capacidade da unidade de digestão                          | 12         | t                       |
| Capacidade total de alimentação dia                        | 1          | m <sup>3</sup> /d       |
| Capacidade de alimentação da unidade de digestão dia       | 0,6        | t/d                     |
| Faixa de Vazão de Biogás                                   | De 0 - 20  | m <sup>3</sup> /h       |
| TDH (dias)                                                 | De 20 a 30 | dias                    |
| Umidade                                                    | 85         | %                       |
| Densidade                                                  | 0.6        | tonelada/m <sup>3</sup> |
| Sólidos voláteis                                           | 90         | %                       |
| Potencial de geração de metano máximo                      | 300        | m <sup>3</sup> /t       |
| Potencial de geração de metano (conversão 70%)             | 210        | m <sup>3</sup> /t       |
| Geração de metano (eficiência=100%) seco- condição BMP     | 18.9       | m <sup>3</sup> /d       |
| Geração de metano (eficiência=100%) SSV- condição contínua | 36.45      | m <sup>3</sup> /d       |

Fonte: A Autora (2023).

Com base nos estudos anteriores, observou-se a importância de realizar o controle do processo de forma minuciosa, o que determinou então no formato do equipamento em três principais fases: (1) Tanque de Hidrólise/Acidificação I visando a pré-fermentação e a correção do pH, (2) Tanque de Hidrólise/Acidificação II visando a correção do pH e observando o início da metanização e por fim (3) um tanque de biodigestão onde ocorrerá a metanização por completo.

A Figura 33 apresenta um fluxograma da unidade de biodigestão anaeróbia implantada nas dependências do CEASA/PE – Recife.

Figura 33 - Fluxograma do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

### 3.4.2 Componentes do Biodigestor em Escala Piloto

O sistema de biodigestão (Figura 34) foi confeccionado em aço inox AISI 304, com isolante térmico, espessuras da chapa de 1/8", controles automáticos de temperatura e pressão, além de sistemas de triagem. Os mesmos estão sendo monitorados periodicamente através dos parâmetros de pressão, temperatura, geração de biogás, além do digestato e outras variáveis que podem influenciar na biodegradação e geração de metano.

Figura 34 - Sistema de biodigestão anaeróbia em escala piloto instalado no CEASA/PE - Recife utilizado na pesquisa (fotos após a instalação)



Fonte: A Autora (2023).

Os itens a seguir descrevem os principais componentes da unidade de biodigestão, envolvendo: Esteira de Seleção Manual, Esteira Elevatória de Taliscas, Moinho Triturador, Tanque de Diluição, Tanque de Hidrólise/Acidificação I, Tanque de Hidrólise/Acidificação II, Tanque de Metanização, Gasômetro, Secador Horizontal, Lavador de Gases, Desumidificador, Filtro de  $H_2S$ , Flare (Queimador), Plataforma, Bomba de Engrenagem, Tubulação, Quadro de Comando, Válvulas e Instrumentos.

#### a) Esteira de Seleção Manual

O primeiro equipamento que compõe a unidade de biodigestão anaeróbia é a esteira manual. Com capacidade de carga de 50kg/m, sua função principal é a seleção de forma manual dos materiais, permitindo assim a remoção de substâncias inadequadas para o tratamento via digestão anaeróbia, como plásticos, vidros, metais, dentre outros elementos indesejados ao processo. Sua estrutura foi confeccionada em aço carbono, com sistema de acionamento por motorreductor de 0,180kW, tensão de 220V/380V,

com velocidade controlada pelo operador, que após verificação foi estabelecida em 8m/min.

b) Esteira Elevatória de Taliscas

Após separação do material na esteira de seleção, o resíduo é transportado por uma esteira elevatória de taliscas, equipada com sistema de acionamento por motorreductor de 0,180kW, tensão de 220V/380V, com velocidade da esteira e capacidade de carga de 8 m/min e 50 kg/m, respectivamente. Esta esteira tem como função principal o direcionamento do material orgânico previamente selecionado na esteira de seleção manual até a entrada do moinho triturador.

c) Moinho Triturador

Com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas e promover a homogeneização dos resíduos de frutas e verduras *in natura*, foi integrado um moinho triturador ao sistema de biodigestão. O mesmo possui um motor com rotação de 3.450 rpm, capacidade de trituração de 270 kg/h e impulsionado por um motor elétrico de 2,2 kW. Ressalta-se que, a depender do tipo de resíduos, faz-se necessário inserir água ou lixiviado para facilitar o processo de trituração.

d) Tanque de Diluição

Após a trituração dos resíduos no moinho triturador, o material é direcionado através de tubulações para um Tanque de Diluição. Esse tanque foi projetado para permitir o controle do pH antes da entrada do substrato ou inóculo nos tanques de Pré-Fermentação I e II. Para tanto, o equipamento possui capacidade de 500L, equipado com um misturador acionado por motor elétrico de 0,180 kW.

e) Tanques de Pré-Fermentação

Após correção do pH no tanque de diluição, o material segue para os Tanques de Pré-Fermentação I e II. Nestes tanques, a operação é realizada com o pH em torno de 5,0–6,0. Estes, com volumes de 2m<sup>3</sup> e 3 m<sup>3</sup>, respectivamente, foram confeccionados providos de misturador com motor de 0,37 kW e redutor para 42 rpm. Acoplado ao tanque, estão instrumentos de medição e controle de temperatura, medição da pressão e medição de pH interno, com válvula de segurança para liberação do gás em caso de sobrepressão. Na parte superior dos tanques foi instalado um visor de acrílico, com o intuito de proporcionar ao operador a avaliação interna do sistema.

f) Tanque de Metanização

O terceiro tanque que compõe o sistema é o Tanque de Metanização, onde ocorre o estágio metanogênico. Nesta etapa o ideal é o sistema ser operado com pH variando entre 6,0 e 8,0. Possui volume total de 15m<sup>3</sup>, provido de misturador com motor de 0,37kW e redutor para 42 rpm, instrumentos de medição e controle de temperatura, medição da pressão e medição de pH interno, com válvula de segurança para liberação do gás em caso de sobrepressão. Assim como nos demais tanques, na parte superior do tanque de metanização foi instalado um visor, com o intuito de proporcionar a avaliação interna do sistema.

g) Plataforma

Para garantir o acesso seguro ao biodigestor em virtude da altura do mesmo, foi instalada uma plataforma de acesso equipada com corrimão e escada tipo marinho.

h) Bomba de Engrenagem, Tubulação, Quadro de Comando, Válvulas e Instrumentos

Compõem ainda o sistema duas bombas de engrenagem de deslocamento positivo de 1750 rpm, com motor de 1,50 kW para proporcionar o transporte do material orgânico, tubulação de material orgânico e digestato, além de um quadro elétrico de proteção e comando dos sistemas com todos os componentes eletroeletrônicos e sinalização.

i) Gasômetro

O gasômetro utilizado para coleta do biogás é composto por uma lona de PVC, com capacidade unitária de 30m<sup>3</sup> e dimensões de 3 metros de diâmetro e 10 de metros comprimento. O mesmo está provido de instrumentos de medição de vazão para o monitoramento de fluxo de gás, além de uma válvula de segurança que permite a liberação do gás em caso de sobrepressão, garantindo a segurança do sistema.

j) Lavador de Gases

O lavador de gases visando a remoção de impurezas foi confeccionado em aço inox, tipo cilindro vertical, com diâmetro de 0,30m e altura de 0,65m.

k) Desumidificador

O desumidificador de biogás confeccionado tipo cilindro vertical foi projetado visando a redução de umidade em até 90%, com capacidade de 25m<sup>3</sup>/h.

l) Filtro de H<sub>2</sub>S

O filtro para remoção de H<sub>2</sub>S do biogás foi confeccionado em aço inox AISI 304, do tipo cilindro vertical, com diâmetro de 0,20m e altura de 1,0m.

m) Grupo Motogerador

O Gerador de eletricidade é do tipo bioflex, com potência de 9,5kVA, tensão de 110/220V, monofásico, 60Hz, motor de ciclo Otto.

n) Secador Horizontal

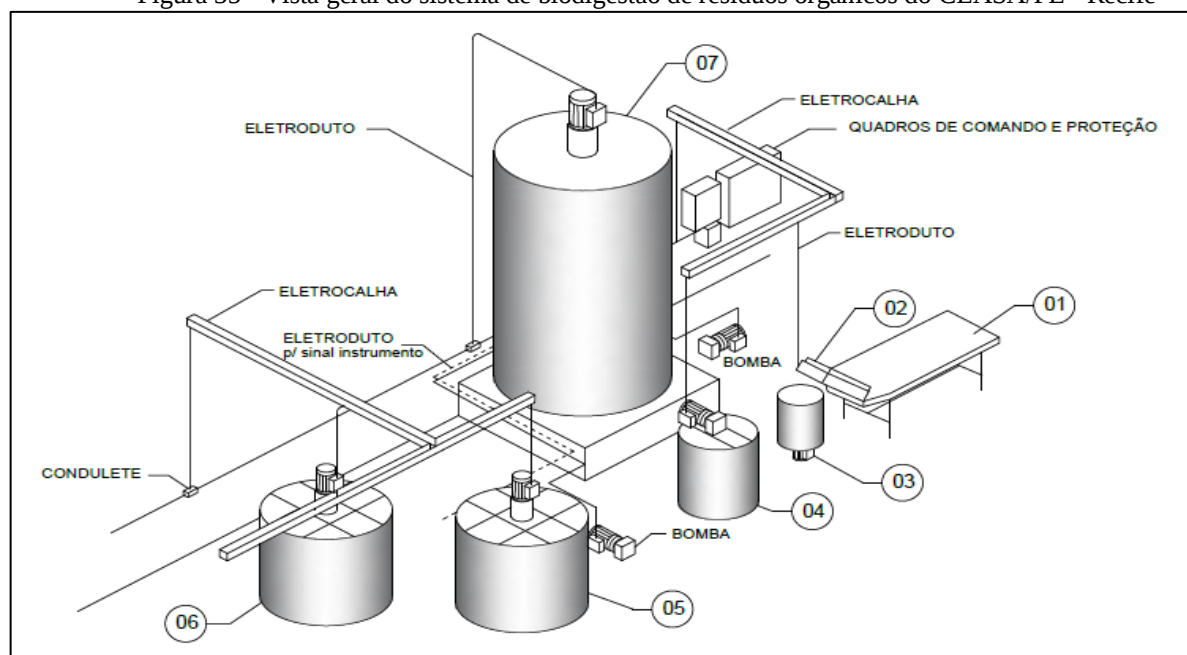
O secador possui sistema de acionamento de motor de 1CV, tensão de 220/380V, sistema de aquecimento e fluido térmico através de resistência elétrica com potência de 10.000W e capacidade para desumidificar 200kg/h.

o) Flare

O Flare foi confeccionado em aço carbono, do tipo cilíndrico vertical, com diâmetro de 0,15 metros e altura de 0,80 metros, provido de bico queimador.

A Figura 35 apresenta uma vista geral com alguns equipamentos que compõem o sistema de biodigestão instalado no CEASA/PE – Recife.

Figura 35 - Vista geral do sistema de biodigestão de resíduos orgânicos do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

\*Legenda: 01: Esteira de seleção; 02: Esteira de talisca; 03: Triturador; 04: Tanque de Diluição; 05: Tanque de Pré-Fermentação I; 06: Tanque de Pré-Fermentação II; 07: Tanque de Metanização

### 3.4.3 Partida, operação e monitoramento do sistema de biodigestão anaeróbia

A partida do sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE - Recife foi realizada inicialmente com o preenchimento de 4m<sup>3</sup> de lodo no Tanque de metanização e 500L no Tanque de Pré-Fermentação II. Após a introdução dos inóculos no reator, este foi mantido em repouso por dois dias, para então ser realizada a primeira carga aplicada ao sistema com os resíduos de frutas e verduras proveniente dos galpões do CEASA/PE – Recife.

O início da alimentação foi realizado utilizando 100kg de resíduos, sendo aumentadas progressivamente visando evitar possível acidificação. A Figura 36 apresenta as diferentes etapas realizadas na partida do sistema.

Figura 36 - Etapas para a partida do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

\*Legenda: a) Coleta do lodo na ETE; b) Preenchimento do lodo no sistema de biodigestão anaeróbia; c) Descarte dos resíduos no pátio do CEASA/PE - Recife; d) Amostra de resíduo após separação; e) Resíduos dispostos na esteira de seleção manual; f) Amostra no tanque de diluição

A alimentação do sistema de biodigestão segue uma sequência específica, conforme descrito nos itens a seguir:

#### 1. Coleta e transporte dos resíduos

Os coletores são transportados por caminhões de coleta e direcionados até o sistema de biodigestão instalado no CEASA/PE – Recife.

## **2. Pesagem e Segregação dos resíduos na esteira de separação**

Os resíduos destinados ao sistema de biodigestão são inicialmente pesados em balança digital e a massa registrada em planilha de dados. Após pesagem da massa de resíduos coletados, os mesmos são triados manualmente na esteira de separação. Materiais impróprios ao tratamento como os resíduos do tipo recicláveis são retirados e registrados na planilha de dados.

## **3. Trituração e diluição do substrato**

Após triagem, o resíduo é destinado através da esteira elevatória de taliscas para o triturador, visando reduzir o tamanho médio das partículas, otimizando o processo da digestão anaeróbia e favorecendo a etapa de hidrólise. Alguns resíduos requerem a adição de líquidos para um melhor desempenho do triturado. Para tanto, adiciona-se lixiviado ou o próprio digestato proveniente do tanque de metanização para auxiliar no processo.

## **4. Homogeneização da amostra**

Ao final da etapa de trituração, a amostra segue para o tanque de diluição, onde é realizada a medição do pH e a adição de alcalinizantes. Posteriormente a amostra é homogeneizada.

## **5. Tanques de Pré-Fermentação**

O material segue após homogeneização aos tanques de fermentação, que podem trabalhar em série ou em paralelo. Nesses tanques são realizados os testes de pH, medição de pressão, vazão e uma pré-fermentação antes do envio para o tanque de metanização.

## **6. Tanque de Metanização**

No tanque de metanização, é realizada uma mistura da amostra proveniente dos tanques de pré-fermentação com o lodo. Após agitação, são realizadas medições de pH e monitoramento do gás.

## **7. Higienização e secagem do biofertilizante**

Após sair do metanizador, o biofertilizante é transportado por tubulações até a etapa de higienização, na qual o material é aquecido a uma temperatura de 60 à 80 graus visando garantir um controle microbiano adequado. Essa medida visa atender aos aspectos legais para o uso do biofertilizante após o processo de digestão. Posteriormente o material é encaminhado para o tanque de secagem, onde ocorre a remoção da umidade.

## 8. Tratamento do gás

O biogás é direcionado para a linha de gás principal e passa por um tratamento realizado através do lavador de gases, desumidificador e um sistema removedor de  $H_2S$ .

## 9. Gasômetro

Após tratamento, o gás é armazenado em um gasômetro e, posteriormente, direcionado através de uma linha de gases ao motor gerador.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros operacionais do sistema de biodigestão contínuo do CEASA/PE - Recife. A alimentação do sistema é sempre realizada de segundas às sextas-feiras no período da manhã, a depender da disponibilidade da coleta de orgânico realizada no CEASA/PE - Recife. Os reatores permanecem em agitação durante 4 horas por dia, visando a homogeneidade da amostra.

Tabela 10 - Parâmetros operacionais do sistema de biodigestão em escala experimental instalado no CEASA/PE - Recife

| Descrição                                     | Valor     | Unidade de medida |
|-----------------------------------------------|-----------|-------------------|
| Capacidade total da unidade de digestão       | 20        | m <sup>3</sup>    |
| Capacidade de resíduos da unidade de digestão | 12        | t                 |
| Capacidade de alimentação diária mínima       | 40        | kg                |
| Capacidade de alimentação diária máxima       | 345       | kg                |
| Volume de lodo total introduzido              | 4,5       | m <sup>3</sup>    |
| Massa de rúmen total introduzida              | 1600      | kg                |
| Temperatura de Operação                       | 35        | °C                |
| Homogeneização                                | 42        | rpm/h             |
| pH                                            | 6,5 – 8,0 | -                 |
| TDH (dias)                                    | 20 – 30   | dias              |
| Período de alimentação semanal                | 5         | dias              |

Fonte: A Autora (2023).

Dentre os desafios envolvendo os diferentes materiais produzidos no sistema de biodigestão, destaca-se a determinação do teor específico de matéria orgânica biogênica, que está relacionada a matéria que pode ser processada e transformada em biogás durante o processo de biodegradação anaeróbia dos resíduos. Para tanto, visando a avaliação da estabilidade do sistema, mensalmente são realizados no Laboratório do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE (GRS/UFPE) a composição físico-química das amostras provenientes dos

três reatores que compõem o sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE - Recife. O Quadro 5 sumariza os parâmetros pesquisados, bem como os métodos de análise.

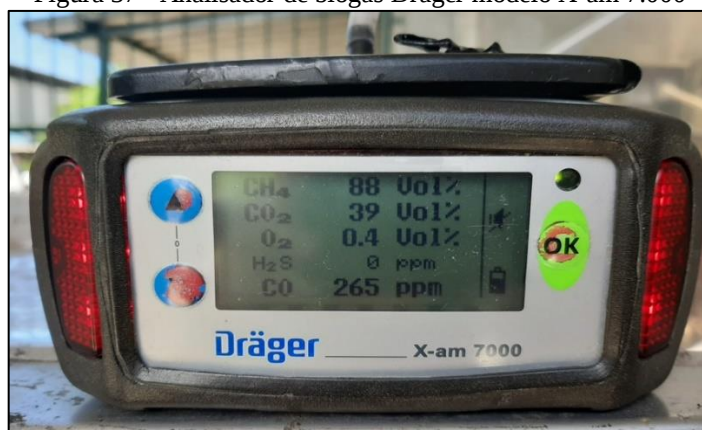
Quadro 5 - Parâmetros referentes à caracterização físico-química do digestato

| Parâmetro              | Unidade                | Metodologia                                                         | Equipamento                          |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| pH                     | -                      | Potenciométrico                                                     | pHmetro Digimed DM23                 |
| Umidade                | %                      | Adaptado de NBR 6457 (1986)                                         | Estufa Te-393/1-Mp                   |
| ST, SV e SF            | %                      | Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995) | Estufa Te-393/1-Mp<br>Mufla EDG 3000 |
| Alcalinidade           | mgCaCO <sub>3</sub> /L | Titulométrica, Método Kapp (1984)                                   | -                                    |
| Ácidos Graxos Voláteis | mg/L Hac               | Método Kapp (1984)                                                  | -                                    |
| DQO                    | mg/L                   | Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995) | Espectrofotômetro Genesys 30         |

Fonte: A Autora (2023).

O monitoramento da geração de biogás foi realizado através do alívio manual do biogás existente na válvula superior do tanque de metanização, com auxílio de uma mangueira, injetada imediatamente no analisador de biogás Dräger modelo X-am 7.000 (Figura 37).

Figura 37 - Analisador de biogás Dräger modelo X-am 7.000



Fonte: A Autora (2023).

O equipamento apresenta uma faixa de leitura de acordo com cada sensor conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Faixa de medição do Dräger X-am 7.000

| <b>Gás</b>       | <b>Faixa de Medição</b> | <b>Faixa de Erro do Equipamento</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 0-100%                  | ± 2,0%                              |
| CH <sub>4</sub>  | 0-100%                  | ± 5,0%                              |
| H <sub>2</sub> S | 0-500ppm                | ± 5,0%                              |
| O <sub>2</sub>   | 0-25%                   | ± 1,0%                              |
| CO               | 0-500ppm                | ± 1,0%                              |

Fonte: Dräger X-am 7.000

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente tópico apresenta e discute os resultados obtidos durante a execução desta pesquisa, os quais incluem ensaios desenvolvidos em laboratório e em campo.

### 4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS DO CEASA/PE - RECIFE

O CEASA/PE - Recife tem uma média mensal de 1.100t de resíduos. Segundo o PGRS (2017), cerca de 65% dos resíduos são transportados para deposição no aterro sanitário da CTR- Candeias e os outros 35% para a empresa Lógica Ambiental visando o tratamento através da compostagem.

O gerenciamento dos resíduos no CEASA/PE - Recife é de responsabilidade do Departamento de Mercado (DEMEC), que fornece mensalmente um relatório técnico com informações relativas aos tipos de resíduos, classificação, quantidade e a destinação final. Desta forma, segundo o PGRS (2017) do CEASA/PE - Recife, no período de janeiro a junho de 2017, foram geradas 5.366,5 toneladas de resíduos do tipo orgânico e recicláveis, indicando uma média mensal de 894 toneladas. Desta média mensal, aproximadamente 53 toneladas foram de resíduos do tipo reciclável, e as demais 841 toneladas referente a resíduos de frutas e verduras.

Câmara *et al.* (2014), ao estudar a caracterização dos resíduos na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo, CEAGESP afirmou que no ano de 2012, foram geradas 43.787,64 toneladas de resíduos e em 2013, esse valor atingiu 45.656,36 toneladas, o que representava respectivamente 3.649 t/mês e 3.804,7 t/mês. Quando comparados com os resultados do CEASA/PE - Recife, observa-se que a CEAGESP apresentou valores bem elevados, visto ser a maior central de distribuição da América Latina.

Visando identificar o percentual dos diferentes tipos de resíduos descartados, foram realizados mensalmente ensaios de composição gravimétrica nos galpões LP1, LP2, LP3 e PRONAF, que demonstraram inicialmente a maior diversidade de resíduos descartados diariamente no CEASA/PE – Recife.

Durante 1 (um) ano de análise nos quatro galpões, observou-se a presença de 47 tipos de resíduos, dos quais 21 tipos de frutas, 20 tipos de vegetais/hortaliças, 3 tipos de folhas/galhos e 3 tipos de materiais recicláveis conforme apresentado na Tabela 12, representando um percentual de 20,34% para folhas e galhos, 2,94% de recicláveis, 45,95% de verduras/hortaliças e 30,77% de frutas. Edwiges *et al.* (2018) ao avaliar os resíduos

orgânicos descartados no CEASA – Unidade Atacadista de Foz do Iguaçu/PR, registrou o aparecimento de aproximadamente 43% de frutas e 57% de vegetais, onde segundo os autores, as frutas como uvas, morangos, pêssegos e maçãs são armazenados separadamente visando evitar danos, de modo que esses materiais acabam por não serem representativos quando apresentados nos descartes. Nos estudos do CEASA/PE - Recife, esta constatação apresentou certa similaridade.

Tabela 12 - Diferentes tipos de resíduos encontrados durante a composição gravimétrica média do CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2021

| <b>Classificação</b>               | <b>Percentual (%)</b> | <b>Resíduos</b>                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frutas                             | 30,77                 | Mamão, Frutas amassadas, Cajá, Coco, Abacate, Laranja, Pinha, Acerola, Sapoti, Maracujá, Banana, Manga, Seriguela, Uva, Acerola, Melancia, Goiaba, Jaca, Limão, Melão, Abacaxi                   |
| Verduras                           | 45,95                 | Folhosos/Hortaliças, Pimentinha, Vagem, Pepino, Abóbora, Jiló, Beringela, Macaxeira, Pimentão, Beterraba, Maxixe, Quiabo, Milho, Tomate, Batata, Cenoura, Chuchu, Cebola, Batata Doce, Abobrinha |
| Recicláveis                        | 2,94                  | Papel, Papelão, Plásticos                                                                                                                                                                        |
| Folhas e Galhos (Resíduos de Poda) | 20,34                 | Folhas e Galhos (Resíduos de Poda), Palha de Milho, Casca de feijão                                                                                                                              |

Fonte: A Autora (2023).

A composição gravimétrica indicou inicialmente resultados satisfatórios quanto ao descarte de resíduos do tipo papel, papelão e plásticos, tendo em vista que esses resíduos apresentaram apenas 2,94% dos resíduos descartados. Estes materiais, considerados como não degradáveis, não são considerados para fins de produção de biogás. O percentual obtido reflete sobre o trabalho de conscientização praticado no CEASA/PE - Recife junto aos comerciantes no que se refere a importância da separação adequada dos resíduos. É importante ressaltar ainda que nesses galpões não foram identificados materiais do tipo rejeitos, que, com base nas definições da PNRS Lei 12.305/2010, são considerados “resíduos sólidos que, depois de esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos

tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade a não ser a disposição final ambientalmente adequada”.

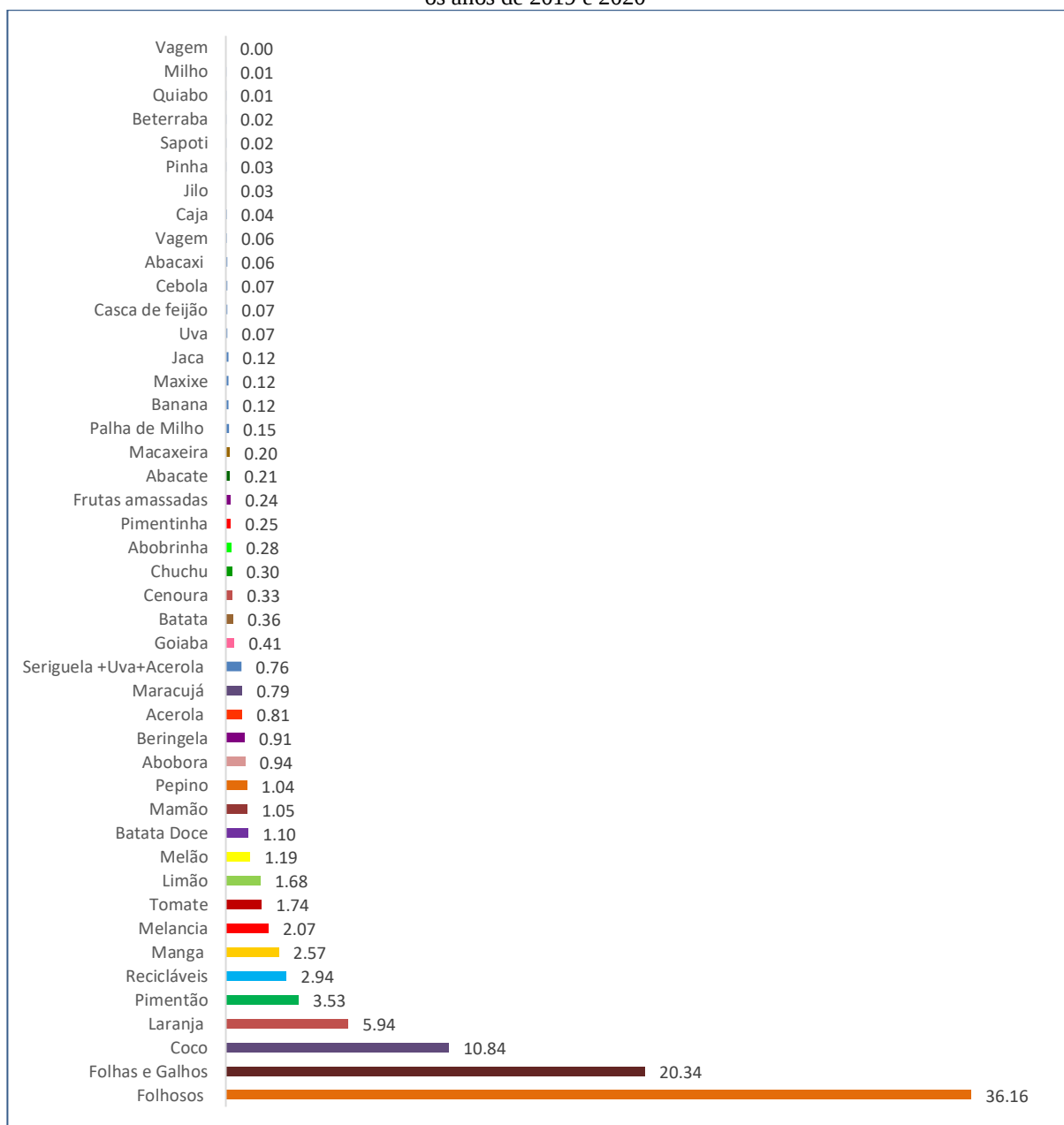
No que concerne aos percentuais de resíduos descartados nos quatro galpões, dos 47 diferentes tipos de resíduos coletados nos ensaios de composição gravimétrica, observou-se que a média anual – considerando os quatro galpões (LP1, LP2, LP3 e PRONAF) – dos resíduos do tipo folhosos/hortaliças apresentaram o maior percentual, com um total de 36,16%, seguido de folhas e galhos com 20,34%, coco com 10,84%, laranja com 5,94% e pimentão com 3,53%. É importante destacar que, a heterogeneidade dos diferentes materiais contidos na constituição dos componentes folhosos/hortaliças dificultou a segregação. Assim, são considerados como produtos deste grupo: acelga, agrião, aipo, alface, cebolinha, coentro, couve comum, couve-flor, espinafre, hortelã, repolho e salsa.

Em contrapartida, os resíduos que obtiveram menores descartes foram de quiabo, milho e vagem. A Figura 38 apresenta os percentuais obtidos durante um ano de avaliação dos diferentes tipos de resíduos encontrados na composição gravimétrica.

Em termos de rejeitos, nenhuma das composições observou este tipo de material, o que define a importância do tratamento através da digestão anaeróbia. Ferreira (2015) ao estudar os resíduos do RU da UFMG, também observou uma heterogeneidade no que tange aos diferentes tipos de resíduos orgânicos, com o percentual de inertes correspondentes a menos de 1% do total gerado.

Resplandes *et al.* (2004), ao avaliar a composição gravimétrica dos resíduos do CEASA/GO, encontrou valores similares. Na realização da primeira amostragem os pesquisadores identificaram um maior percentual de resíduos alimentares (82,01%), seguido de madeira (9,49%), papel (5,09%), plástico (1,69%), outros (1,02%) e pet (0,70%). Já na segunda amostragem, os resíduos alimentares apresentaram um menor percentual quando comparado ao ensaio anterior, mesmo assim, prevaleceu com maior evidência, com a seguinte representatividade: 68,20% de resíduos alimentares; 19,25% de madeira; 4,21% de papel; 1,16% de plástico, 3,63% para pet e 3,55% para outros tipos de resíduos.

Figura 38 - Composição Gravimétrica média dos resíduos do CEASA/PE – Recife nos galpões em estudo entre os anos de 2019 e 2020



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.1.1 Frequência de Aparecimento e Composição Gravimétrica

Em termos de frequência de aparecimento, observou-se variações nos diferentes resíduos coletados ao longo do período de análise. A Tabela 13 apresenta a frequência de aparecimento dos resíduos encontrados, onde é possível observar que os resíduos de Beringela, Recicláveis (papel, papelão, plásticos), Pimentão, Folhosos/Hortaliças, Côco, Tomate, Pepino, Manga, Laranja, Melancia, Maracujá e Goiaba estiveram na faixa entre 75 e 100%.

Edwiges *et al.* (2018) ao realizar um estudo similar no CEASA-PR verificou que os resíduos de Abobrinha, Berinjela, Cebola, Limão, Repolho, Couve, Laranja e Tomate foram os mais representativos.

Destaca-se que, os resíduos de frutas e verduras possuem uma maior quantidade de substratos para atuação dos micro-organismos em função dos carboidratos, proteínas e lipídios, facilmente presentes nesses materiais, além de facilmente degradáveis, alto teor de solubilidade e alto teor de umidade (SESWOYA *et al.*, 2019; IZHAR *et al.*, 2021), fatores estes que os tornam adequados para o processo de biodegradação, demonstrando também o potencial destes galpões na produção dos resíduos e consequente inserção da tecnologia da digestão anaeróbia.

Tabela 13 - Frequência de aparecimento dos diferentes resíduos de frutas e verduras descartados no CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2021.

| <b>Intervalo de meses</b> | <b>Faixas (%)</b> | <b>Diferentes resíduos provenientes da composição gravimétrica</b>                                                                               |
|---------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1-3</b>                | <b>1 – 24,9</b>   | Frutas amassadas, Quiabo, Jaca, Acerola, Pinha, Uva, Sapoti, Beterraba, Vagem, Milho, Casca de Feijão, Seriguela + Uva + Acerola, Palha de Milho |
| <b>4-6</b>                | <b>25 – 49,9</b>  | Maxixe, Pimentinha, Mamão, Cebola, Jiló, Abacate                                                                                                 |
| <b>6-9</b>                | <b>50 – 74,9</b>  | Limão, Batata, Abóbora, Melão, Folhas e Galhos, Cenoura, Abobrinha, Batata Doce, Chuchu, Macaxeira, Banana                                       |
| <b>9-12</b>               | <b>75 – 100</b>   | Beringela, Recicláveis, Pimentão, Folhosos, Coco, Tomate, Pepino, Manga, Laranja, Melancia, Maracujá, Goiaba                                     |

Fonte: A Autora (2023).

Com base na Tabela 13, observa-se que, os resíduos do tipo folhosos/hortaliças, coco, laranja, pimentão, recicláveis, tomate e beringela apareceram em todos os meses durante a análise de composição gravimétrica nos quatro galpões selecionados no CEASA/PE - Recife. Assim, observa-se que, mesmo considerando a existência de sazonalidade na oferta dos produtos, esses componentes apresentaram um percentual de resíduos quando em situações de meses em ofertas reduzidas.

Em termos percentuais, esses resíduos apresentaram um percentual de 62% do total de resíduos na composição gravimétrica. Porém, considerando a importância do estudo em termos de produção de biogás, e considerando os resíduos do tipo recicláveis como papel, papelão e plásticos apresentam lenta biodegradabilidade para a geração de biogás e não são

indicados para a utilização em biodigestores anaeróbios, e que os resíduos de côco em função da limitação da trituração de um biodigestor em escala de campo também não se adequa a esta situação, neste estudo foram selecionados os resíduos de **(1) folhosos/hortaliças, (2) laranja, (3) pimentão, (4) tomate e (5) beringela**, que representam 48,29% dos resíduos de frutas e verduras.

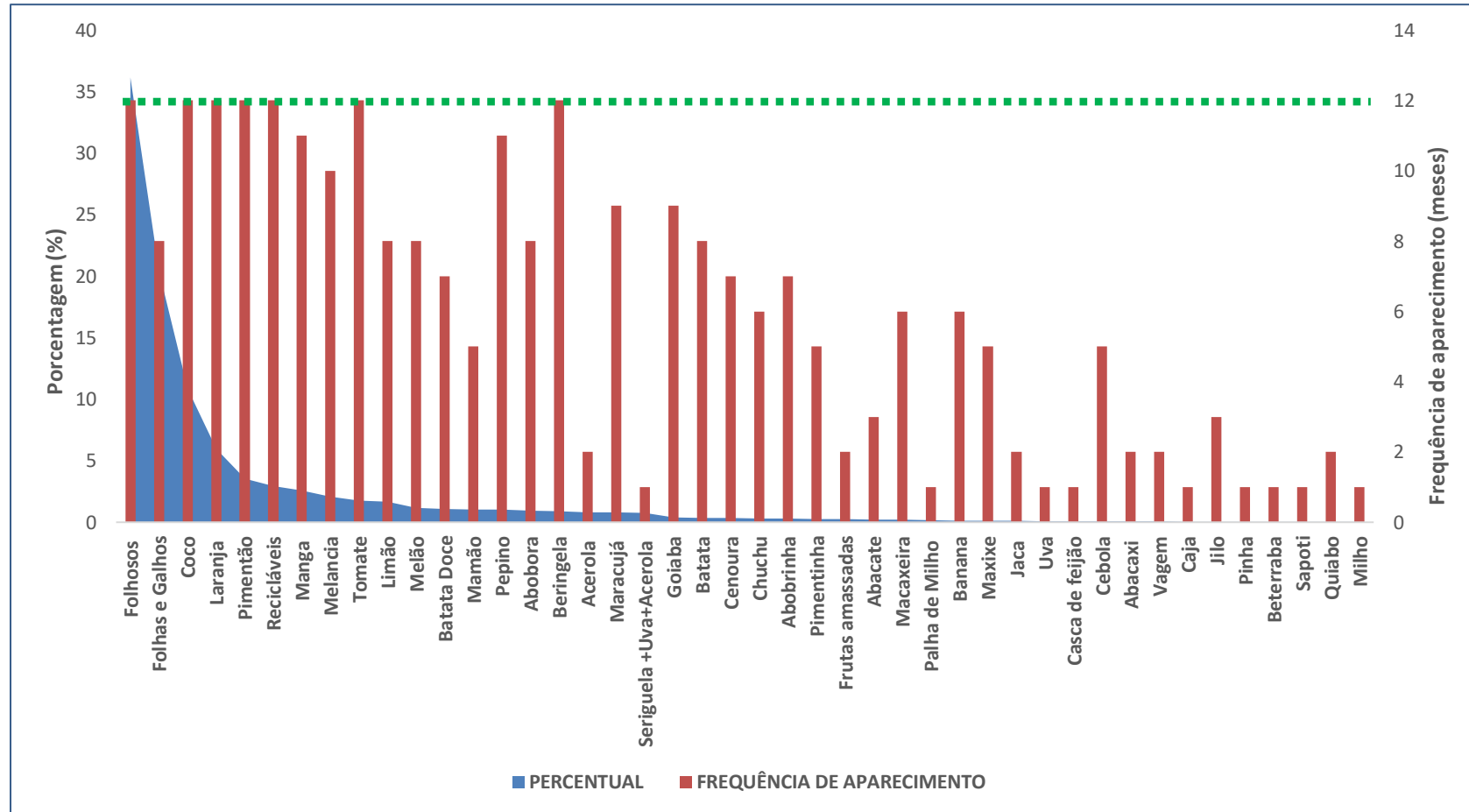
Esses resíduos possuem singularidades que podem ser benéficas ou não para a produção de biogás em sistemas anaeróbios. Substratos ricos em carboidratos, como frutas e verduras, são produtores rápidos de ácidos graxos voláteis, o que pode levar a acidez, diminuição de pH e inibição do processo. A fração orgânica dos resíduos provenientes de frutas e verduras geralmente contém aproximadamente 75% de açúcares e hemiceluloses, 9% de celulose e 5% de lignina (PAPARGYROPOULOU *et al.*, 2014; KUO; DOW 2017). Porém, embora rico em compostos produtores de energia, esta pode não ser uma combinação bem equilibrada para digestão anaeróbia (PILARSKA *et al.*, 2023).

Santos *et al.* (2018) afirmam que, o bagaço da laranja apresenta algumas características na sua composição que podem ser consideradas desafios no contexto da digestão anaeróbia, tais como o pH de teor ácido e o elevado teor de material lignocelulósico. Adicionalmente, as cascas contêm um óleo essencial (D-limoneno) em sua superfície, o que poderá ser determinante na inibição dos processos biológicos. Para tanto, a viabilidade da utilização desse tipo de resíduo na digestão anaeróbia poderá ser realizada desde que seja utilizado um inóculo apropriado.

Os caules e folhas do tomate contêm várias substâncias bioativas, como fenóis, flavonóides e glicoalcalóides, que apresentam possíveis efeitos antimicrobianos, antivirais e antifúngicos (SILVA-BELTRÁN *et al.*, 2015). Porém, o teor relativamente baixo de lignina e hemicelulose, além de uma relação C/N favorável (SZILÁGYI *et al.*, 2021), a elevada umidade presente no bagaço de tomate fresco, combinada com níveis consideráveis de nutrientes e a elevada taxa de biodegradação, torna o processo de digestão anaeróbia deste tipo de resíduo extremamente atrativo. (SANTOS *et al.*, 2018; ASQUER *et al.*, 2015; SCANO *et al.*, 2014; FĂRCAȘ *et al.*, 2019).

A Figura 39 apresenta uma correlação da composição gravimétrica dos resíduos encontrados com a frequência de aparecimento, tendo sido considerado a quantidade total de resíduos analisadas.

Figura 39 - Correlação entre a composição gravimétrica média e a frequência de aparecimento dos resíduos do CEASA/PE – Recife nos galpões em estudo entre os anos de 2019 e 2020



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.1.2 Caracterização dos resíduos de frutas e verduras com maior frequência de aparecimento

A Tabela 14 apresenta de forma resumida os resultados da caracterização realizada para todos esses resíduos em termos de pH, umidade, sólidos voláteis, análise elementar (C, N, S e H), relação C/N, teor de fibras (lignina, celulose, hemicelulose), constituintes bioquímicos (carboidratos, proteínas e lipídeos) e grau de biodegradabilidade.

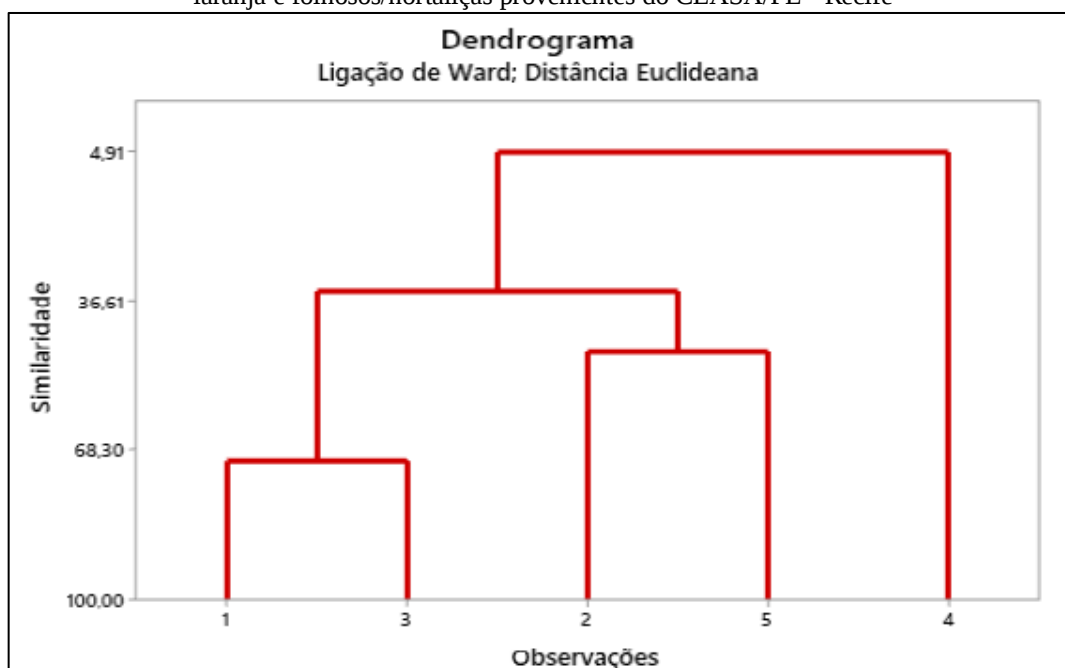
Tabela 14 - Resultados da caracterização dos resíduos de frutas e verduras do CEASA/PE - Recife com maior frequência de aparecimento entre os anos de 2020 e 2021

| <b>Parâmetro</b>                | <b>Pimentão</b> | <b>Beringela</b> | <b>Tomate</b> | <b>Laranja</b> | <b>Folhosos</b> |
|---------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|-----------------|
| pH                              | 6,02            | 7,59             | 5,27          | 5,13           | 6,13            |
| Umidade (%)                     | 93,63           | 93,72            | 94,92         | 84,49          | 91,45           |
| Sólidos Voláteis (%)            | 86,00           | 90,75            | 86,88         | 95,48          | 80,71           |
| Carbono (%)                     | 36,60           | 33,51            | 34,48         | 33,16          | 33,92           |
| Hidrogênio (%)                  | 7,54            | 6,64             | 7,34          | 7,94           | 5,55            |
| Nitrogênio (%)                  | 2,19            | 2,27             | 1,91          | 1,03           | 2,97            |
| Enxofre (%)                     | 1,33            | 1,30             | 1,30          | 1,44           | 1,15            |
| Relação C/N                     | 16,71           | 14,76            | 18,05         | 32,19          | 11,42           |
| Fibra em Detergente Neutro      | 40,91           | 47,36            | 26,82         | 22,54          | 68,48           |
| Fibra em Detergente Ácido       | 39,62           | 46,07            | 24,13         | 22,31          | 41,67           |
| Celulose (%)                    | 7,12            | 41,97            | 22,60         | 13,57          | 33,75           |
| Hemicelulose (%)                | 1,29            | 1,29             | 2,69          | 0,23           | 26,81           |
| Lignina (%)                     | 33,50           | 8,19             | 6,95          | 8,54           | 4,78            |
| Carboidrato (%)                 | 41,91           | 51,45            | 32,24         | 22,34          | 60,62           |
| (Celulose+Hemicelulose/Lignina) | 0,25            | 5,28             | 3,64          | 1,62           | 1,43            |
| Proteínas (%)                   | 0,14            | 0,17             | 0,12          | 0,06           | 0,19            |
| Lipídeos (%)                    | 0,05            | 0                | 0,03          | 0,04           | 0,02            |

Fonte: A Autora (2023).

A partir da caracterização química, foi realizada uma análise de agrupamentos (Análise de Cluster) para os resíduos em estudo com características semelhantes, levando em consideração os parâmetros de pH, umidade, sólidos voláteis, carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, relação C/N, proteínas e lipídeos. Considerando uma similaridade de 68,0, formaram-se 4 grupos distintos (Figura 40), onde observa-se que para esse nível de similaridade, apenas o grupo formado por resíduos de pimentão e tomate apresentaram características similares de acordo com o teste estatístico realizado.

Figura 40 - Análise de Cluster a partir da caracterização química dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

\* Legenda: 1. Pimentão, 2. Beringela, 3. Tomate, 4. Laranja, 5. Folhosos

#### 4.2 PH, TEOR DE UMIDADE E TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE - RECIFE

O parâmetro de avaliação do pH é de grande relevância ao estudo da digestão anaeróbia, visto que seus resultados podem comprometer as atividades dos micro-organismos acidogênicos e metanogênicos, inibindo o processo de produção de biogás (JABEEN *et al.*, 2015). Os resíduos de frutas e verduras em geral tem como característica um pH mais ácido. Dentre os resultados encontrados, a laranja e o tomate apresentaram os resultados mais baixos, com pH de 5,13 e 5,27, respectivamente. Esses resultados são semelhantes ao

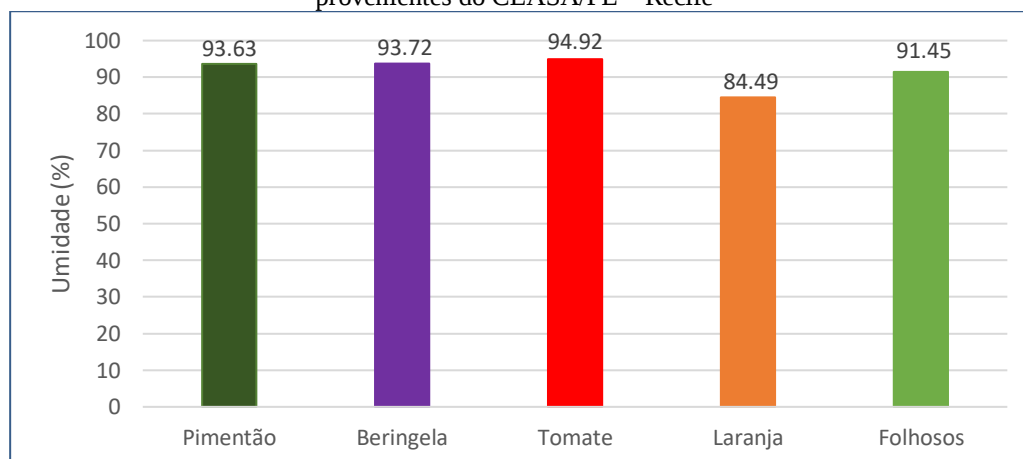
encontrado por Martinez *et al.* (2017) de 5,4 para tomate e por Gunaseelan (2004) que obteve um pH de 5,3 para o bagaço de laranja.

Já os resíduos de pimentão, folhosos/hortaliças e beringela apresentaram um pH mais elevado, com valores de 6,02, 6,13 e 7,59, respectivamente, semelhante ao encontrado por Leite *et al.* (2009) para resíduos vegetais (6,90). Pereira *et al.* (2009) e Ward *et al.* (2014) recomendam valores entre 6,5 e 7,5 aptos para a biodigestão anaeróbia, visto ser o intervalo ótimo para o crescimento dos micro-organismos produtores de metano. Para tanto, parte dos resíduos de frutas e verduras desta pesquisa encontram-se fora desta faixa sugerida, sendo necessária a realização de correção do pH. Neste sentido, a importância da co-digestão desses com inóculos para o tratamento através da biodigestão anaeróbia pode ser significativa, visando catalizar o processo, aumentar o pH e promover a redução de utilização de uma elevada quantidade de produtos químicos visando evitar a acidificação do processo.

A Figura 41 apresenta os resultados percentuais de umidade dos 05 (cinco) resíduos de frutas e verduras com maior representatividade durante a composição gravimétrica realizada nos diferentes galpões do CEASA/PE - Recife. Os resíduos de Tomate, Beringela e Pimentão apresentaram teores de umidade similares de 94,92%, 93,72% e 93,63%, respectivamente. Martinez *et al.* (2015) e Jahanbakhshi *et al.* (2019) ao estudar resíduos de tomate, obtiveram um percentual de 94% e 94,29% respectivamente, o que se assemelha ao desta pesquisa.

Os resíduos dos materiais folhosos/hortaliças apresentaram um percentual de 91,45% de umidade, similar ao encontrado por Storck *et al.* (2013), que ao avaliar a composição das partes de frutas e hortaliças, encontrou teores de umidade de 93,1% para folhas de couve-flor e 89,3% para folhas de brócolis. Para a beringela, o percentual obtido de 93,72% foi o mesmo que o encontrado por Osidacz e Ambrosio-Ugri (2013) ao realizar análises físico-química da beringela. Rinaldi *et al.* (2008) ao avaliar as características físico-químicas de diferentes tipos de pimentão observou percentuais de 93,85% e 92,59% também bem próximos ao encontrado nesta pesquisa (93,63%).

Figura 41 - Teor de umidade dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE – Recife



Fonte: A Autora (2023).

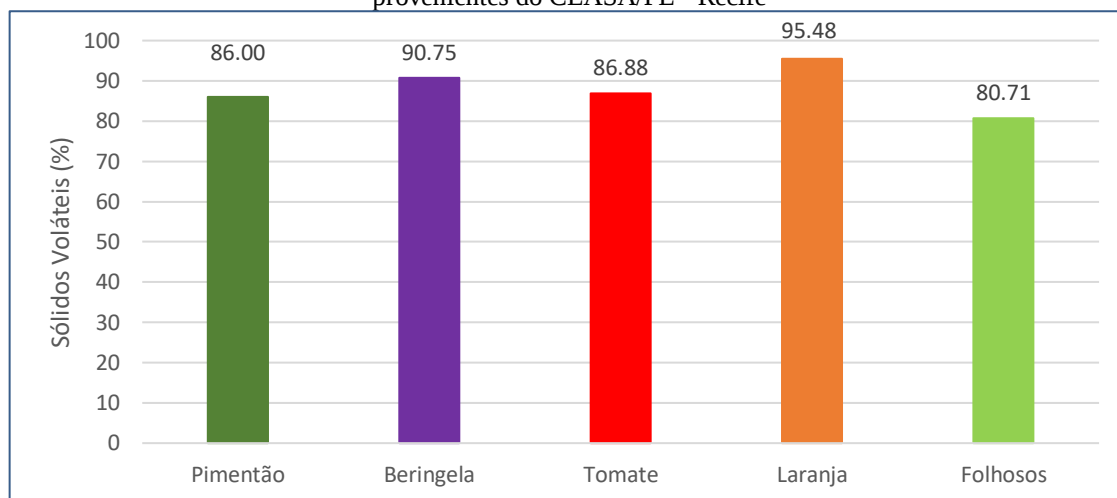
O maior diferencial observado foi para os resíduos de laranja, que apresentaram um percentual de 84,49%, similar ao encontrado por Santos (2019) que ao estudar o potencial de geração de biogás em resíduos agroindustriais de frutas, obteve resultado similar de umidade para bagaço de laranja *in natura*, com percentual de 86,59%.

Neste sentido, os percentuais de umidade encontrados para os resíduos de tomate, pimentão, beringela, folhosos/hortaliças e laranja são indicativos de resíduos rapidamente degradáveis, favoráveis a digestão anaeróbia. Destaca-se ainda que, elevados percentuais de umidade podem apresentar como prerrogativa a possibilidade de tratamento por biodigestão anaeróbia sem a necessidade de pré-tratamento (APPELS *et al.*, 2011; KHALID *et al.*, 2011).

Santos (2017) afirma que podem ainda ser observadas variações de umidade entre diferentes espécies de frutas e verduras. Esta constatação pode ser em decorrência de, segundo Firmo (2013) a sensibilidade deste parâmetro às variações climáticas e a composição do material.

A Figura 42 apresenta os resultados para os percentuais de sólidos voláteis encontrados para os resíduos de pimentão, tomate, beringela, laranja e folhosos/hortaliças, onde os percentuais apresentaram variações entre 80,71% e 95,48%, semelhante ao encontrado por Bouallagui *et al.* (2004), que ao estudar uma composição de resíduos de frutas e verduras coletadas do mercado de Tunis encontrou uma concentração total em torno de 87%. Cabbai *et al.* (2013) obteve percentuais de 89,30% e 89,10% e Ganesh *et al.* (2014), com 86,8%. Já Santos Filho (2018) ao estudar os resíduos do CEASA/PE - Recife, numa amostra com uma diversidade de resíduos apresentou um percentual de 98,03%. Esses elevados percentuais demonstram a alta presença da matéria orgânica, indicando o potencial de biodegradação desses resíduos.

Figura 42 - Teor de sólidos voláteis dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

Os resíduos de frutas e verduras apresentam elevados teores de sólidos voláteis e são facilmente degradados em digestores anaeróbios. A rápida fase de hidrólise desses resíduos pode levar a acidificação de um digestor e a consequente inibição da metanogênese (WARD *et al.*, 2008).

De maneira geral, os percentuais tanto para os teores de umidade quanto de sólidos voláteis dos resíduos apresentaram valores próximos. Estas similaridades tem relação com as propriedades específicas das espécies, da região onde é produzida e condições de processamento industrial que sofreram, sendo estas variações esperadas e comuns nestes resíduos (SANTOS, 2019).

#### 4.3 RESULTADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE - RECIFE

Em termos de análise elementar, para todas as amostras, o carbono foi o elemento encontrado em maior quantidade, com destaque ao percentual do pimentão que apresentou 36,60% deste elemento que é a base para o fornecimento de energia para os micro-organismos (KHALID *et al.*, 2011). O elemento com menor percentual de maneira geral foi o de enxofre, com percentuais variando entre 1,15 e 1,44, o que é indicativo de uma digestão favorável quando comparado ao carbono tendo em vista a competição entre sulfato redutores e metanogênicos (Silva *et al.*, 2019).

O nitrogênio é o segundo nutriente importante para a formação de enzimas responsáveis pela realização do metabolismo, visto que, o excesso deste elemento poderá

causar uma excessiva formação de amônia ( $\text{NH}_3$ ) podendo promover um colapso na formação dos micro-organismos (FNR, 2013). A laranja apresentou o menor percentual, com 1,03%, resultado semelhante ao encontrado por Santos *et al.* (2018) e Martín *et al.* (2010) de 1,38 e 1,20, respectivamente.

A baixa relação C/N e a alta biodegradabilidade são limitações importantes a serem observadas para a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, o que pode resultar na inibição do processo devido ao rápido acúmulo de ácidos graxos voláteis (JABEEN *et al.*, 2015). A relação C/N apresentou variações entre 11,42 a 32,19 para os resíduos de frutas e verduras estudados nesta pesquisa. Segundo Braguglia *et al.* (2018), os resíduos de frutas e verduras normalmente possuem uma relação C/N relativamente baixa, variando entre 13,2 e 24,50. Edwiges (2017) ao estudar resíduos hortifrutigranjeiros obteve uma média de 33,7 e Bouallagui *et al.* (2009) encontrou um resultado similar de 34,2. Já Cobbai *et al.* (2013) ao estudar resíduos orgânicos observou uma relação C/N de 22,66 e 16,27.

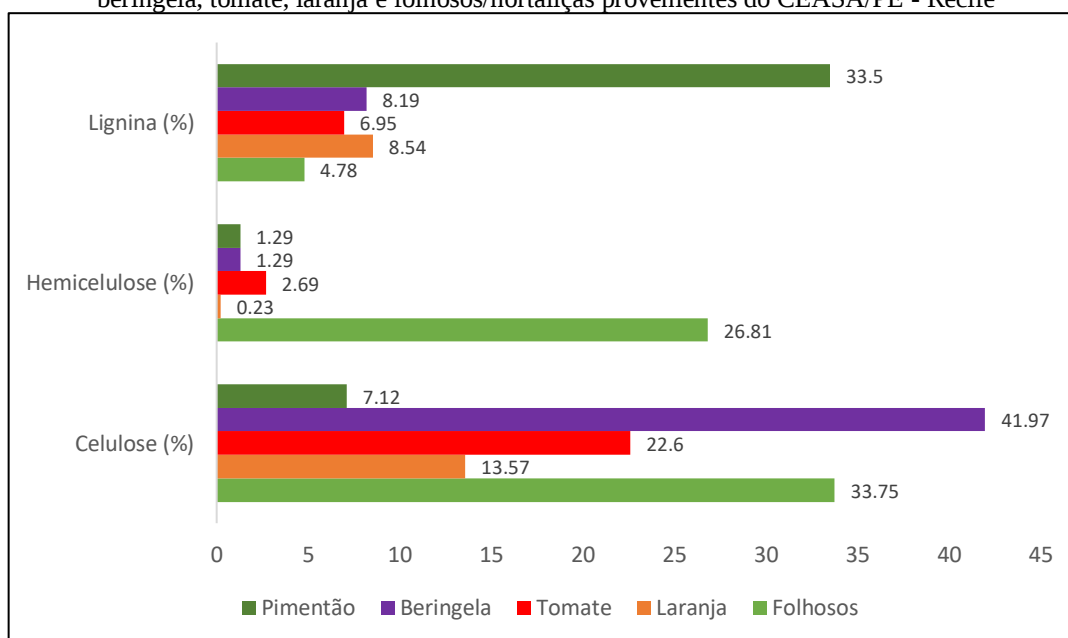
Uma relação C/N menor que 15 em geral é definida como baixa e demonstra que esses resíduos podem ser ricos em proteínas e prejudiciais nos processos de tratamento biológico em virtude do acúmulo de nitrogênio amoniacal (FERREIRA, 2019; BRAGUGLIA *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018). Para tanto, os resíduos de folhosos apresentam a menor relação C/N com 11,42, semelhante a Leite *et al.* (2009) que encontrou essa relação com a magnitude de 12,1 para resíduos sólidos vegetais.

Na literatura, a definição quanto ao padrão favorável para o processo de digestão anaeróbia para a relação C/N é diversificado. Para FNR (2013), o padrão favorável para o processo de digestão anaeróbia para a relação C/N é na faixa entre 10 e 30. DEUBLEIN; STEINHAUSER (2008), afirmam que, o ideal para o processo de digestão anaeróbia para a relação C/N é de 20 a 30, similar ao de Yadvika *et al.* (2004) que apresenta como relação favorável valores entre 25 e 30 e de Bouallagui *et al.* (2009) para a digestão anaeróbia de resíduos de frutas e vegetais que apresenta a relação entre 22 e 25. O aumento dessa relação pode ocasionar uma menor solubilização de proteína; já a diminuição poderá elevar as chances de inibição por amônia (CHERNICHARO, 1997; DEUBLEIN, STEINHAUSER, 2008; OLIVEIRA, 2018).

#### 4.4 TEOR DE FIBRAS E GRAU DE BIODEGRADABILIDADE DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS PROVENIENTES DO CEASA/PE – RECIFE

As condições de biodegradabilidade dos resíduos podem também ser avaliadas através das características bromatológicas, ou seja, carboidratos (amido, celulose, hemicelulose), proteínas, ácidos orgânicos, lipídeos e lignina e uma menor parcela inorgânica (FERREIRA, 2019; KIRAN *et al.*, 2014). A Figura 43 apresenta os percentuais de lignina, hemicelulose e celulose dos substratos estudados.

Figura 43 - Comparativo entre os percentuais de Lignina, Celulose e Hemicelulose dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

A caracterização da fibra do substrato indicou os maiores percentuais para a celulose do resíduo de beringela (41,97%), lignina do resíduo de pimentão (33,50%) e hemicelulose do resíduo de tomate (2,69%). Edwiges *et al.* (2018) observaram uma média de 17,1% de celulose, 9,4% de hemicelulose e 6,4% de lignina ao estudar resíduos de fruta e verduras. Já Campuzano e González-Martinez (2015) ao analisar a produção de metano a partir dos resíduos orgânicos da cidade do México identificou valores de 21,1% de celulose, 5,1% de hemicelulose e 13,5% de lignina. Convém acrescentar que os percentuais são variáveis de acordo com o resíduo estudado.

A dificuldade de converter a biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis deve-se principalmente aos percentuais de lignina, que em virtude da sua complexidade podem

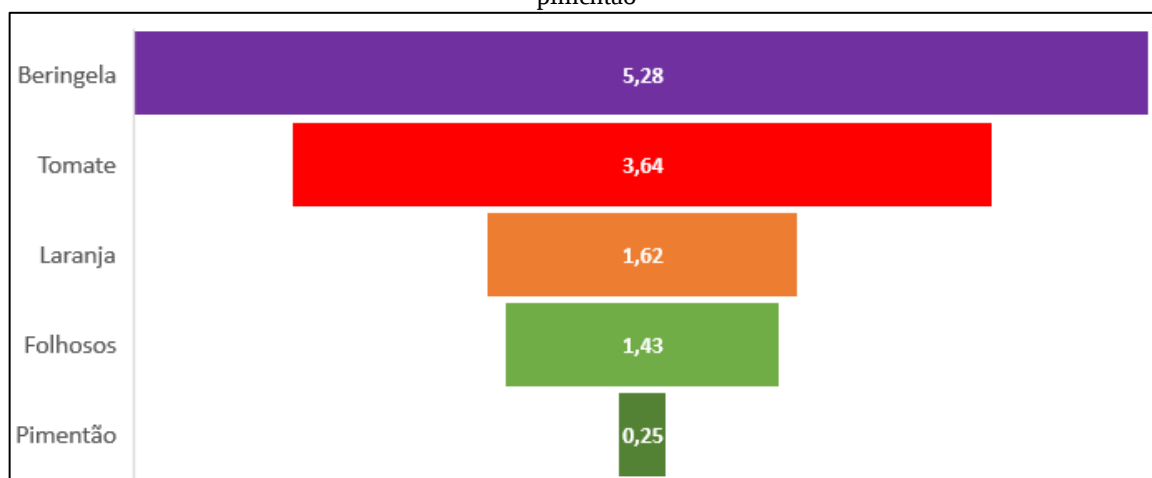
atuar como uma barreira física à degradação, tanto enzimática quanto microbiana (TAHERZADEH; KARIMI, 2008; BARLAZ, 2009; XU *et al.*, 2019), sendo, no entanto, a lignina um indicador negativo de biodegradação. Neste sentido, o pimentão apresentou-se como um resíduo potencialmente limitante para a produção de biogás.

Ao utilizar a proposição para análise do grau de biodegradabilidade na relação celulose+hemicelulose/lignina ((C+H)/L), proposta por Wang *et al.* (1994), observa-se que os resultados apresentaram uma variação entre 0,25 à 5,28. Assim, quanto maior a relação, maior seria a biodegradabilidade e a conversão de biogás (FRANCOU, 2003). Segundo Wang *et al.* (1994), um resultado inferior a 0,24 indica a estabilização do resíduo.

Para tanto, os resíduos de beringela em comparação aos demais resíduos apresentaram resultados satisfatório do ponto de vista da biodegradabilidade no tocante a observação das características bromatológicas apresentando um maior percentual de celulose e da relação ((C+H)/L). Já o pimentão, em virtude do alto percentual de lignina (33,50%) e baixa relação ((C+H)/L) de 0,25 apresenta um indicativo de um substrato de difícil degradação. A Figura 44 apresenta a biodegradabilidade de acordo com a relação (C+H)/L.

Ressalta-se que, a lignina, é um polímero de estrutura complexa, geralmente encontrada associada à parede celular de vegetais, de difícil degradação, que segundo Barlaaz (2009) pode impedir a atuação dos micro-organismos à ação de substâncias degradáveis. Triolo *et al.* (2012), ao avaliarem o potencial de geração de biogás de resíduos vegetais observaram que esses resíduos apresentaram tendência para uma menor biodegradabilidade.

Figura 44 - Fator de biodegradabilidade dos resíduos de beringela, tomate, laranja, folhosos/hortaliças e pimentão

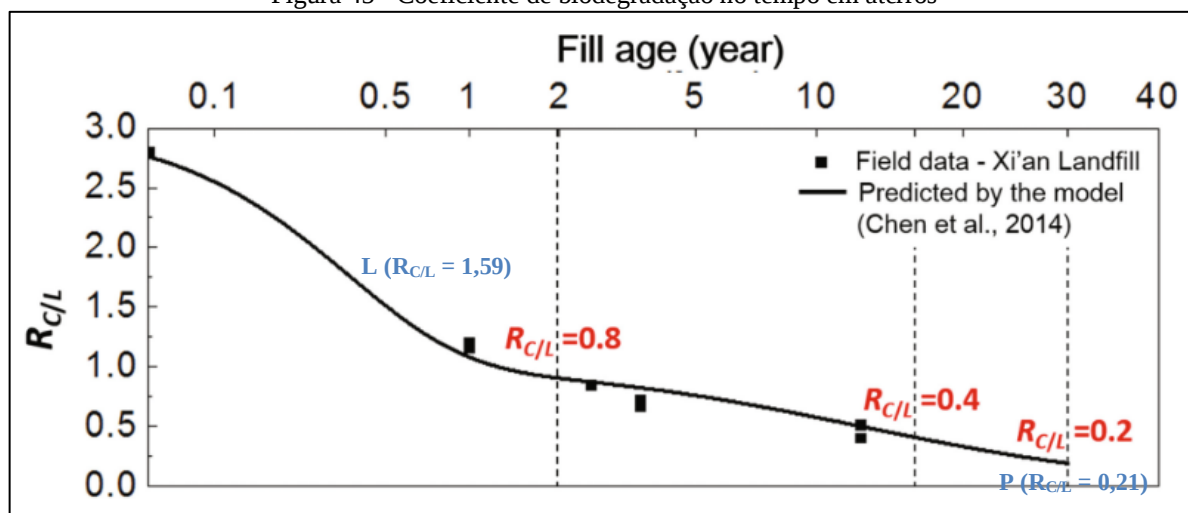


Fonte: A Autora (2023).

São comumente utilizados sistemas de classificação para comparar a mecânica dos resíduos. Em geral, os mesmos são desenvolvidos com base nos materiais e faz referência ao tamanho e dimensão dos componentes. Chen *et al.* (2014), ao avaliarem o coeficiente de biodegradação no tempo em aterros atribui quatro estágios, considerando a variação em termos da relação de celulose e lignina ( $R_{C/L}$ ): (1)  $R_{C/L} \geq 0,8$  para estágio de degradação rápida; (2)  $0,4 \leq R_{C/L} \leq 0,8$  para estágio de degradação lenta; (3)  $0,2 < R_{C/L} < 0,4$  para estágio de pós-estabilização e (4) estágio de estabilização completa quando  $R_{C/L} < 0,2$ .

Com base nesta classificação e comparando os resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos com a relação de biodegradabilidade descrita por Chen *et al.* (2014), observa-se que, os resíduos de pimentão ( $R_{C/L} = 0,21$ ) se aproximam dos resíduos envelhecidos. Já os demais resíduos como tomate ( $R_{C/L} = 3,25$ ), beringela ( $R_{C/L} = 5,12$ ), laranja ( $R_{C/L} = 1,59$ ) e folhosos/hortaliças ( $R_{C/L} = 7,06$ ) apresentam resultados de biodegradabilidade equivalentes a resíduos mais novos. A Figura 45 apresenta a disposição dos resíduos de laranja e pimentão no gráfico proposto por Chen *et al.* (2014).

Figura 45 - Coeficiente de biodegradação no tempo em aterros



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2014).

\*Legenda: L: Laranja; P: Pimentão

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS INÓCULOS: LODO DE ETE E RÚMEN BOVINO

Para a realização dos ensaios de BMP, as amostras de lodo (LE) e de rúmen bovino (RB) foram analisadas anteriormente à incubação. Para tanto foram realizadas análises de pH, alcalinidade, sólidos totais e sólidos voláteis. Os resultados das caracterizações iniciais são apresentados resumidamente na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados das caracterizações iniciais do lodo de ETE e do rúmen bovino

| Parâmetros                        | LE        | RB       |
|-----------------------------------|-----------|----------|
| pH                                | 7,07      | 7,43     |
| Sólidos Totais (mg/L)             | 213.720,0 | 19.040,0 |
| Sólidos Totais Fixos (mg/L)       | 81.040,0  | 11.800,0 |
| Sólidos Totais Voláteis (mg/L)    | 132.680,0 | 7.240,0  |
| ALC. TOTAL mgCaCO <sub>3</sub> /L | 2.120,0   | 4.088,0  |
| AGV mg/L Hac                      | 4.362,50  | 563,76   |
| Relação AGV/AT                    | 2,06      | 0,14     |

Fonte: A Autora (2023).

Em termos de pH, os valores tanto para LE quanto para RB estiveram dentro da neutralidade, com resultados de 7,07 e 7,43, respectivamente. O LE, de consistência granular, teve um resultado similar ao encontrado por Thakur *et al.* (2022). Já para o RB, o valor encontrado é bem semelhante ao de Aragaw *et al.* (2013) que reportaram um resultado de 7,45 para este mesmo tipo de inóculo. Holliger *et al.* (2016) indicam que um inóculo de boa qualidade apresenta um pH variando entre 7,0 e 8,5. Neste sentido, os inóculos de LE e RB corroboram a indicação da literatura.

O LE possuía cerca de 62,08% de sólidos voláteis e 37,92% de sólidos fixos. Este componente apresentava uma textura granular próximo ao citado por Valença (2017) que obteve resultados de lodo com 56,84% de sólidos voláteis e 43,16% de sólidos fixos, resultados que indicam que provavelmente um percentual de matéria orgânica já foi degradado anteriormente. Já para o RB o percentual obtido foi de 38,02% de sólidos voláteis e 61,98% de sólidos fixos.

Observou-se ainda valores de alcalinidade para os inóculos de forma isolada, onde foram obtidos para o LE 2.120,0 mgCaCO<sub>3</sub>/L e para o RB 4.088,0 mgCaCO<sub>3</sub>/L. Esses valores apresentam-se como ideais para controlar a acidificação em um reator anaeróbio, visto que a faixa indicada é de uma alcalinidade de 1.000 a 5.000 mgCaCO<sub>3</sub>/L (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993; BAJPAI *et al.*, 2017).

Os resultados de AGV indicam que o LE (4.362,50 mg/L) poderia causar um processo inibitório em reatores anaeróbios, visto que segundo Duan *et al.* (2012), a faixa entre 1000-3000 mg/L determinam uma inibição moderada do sistema, principalmente no que concerne à produção de metano. Já o RB apresentou um resultado satisfatório do ponto de vista da digestão anaeróbia (563,76 mg/L). Assim, a relação AGV/AT para o lodo (2,06) pode

apresentar-se como um indicativo de problemas na estabilidade em reatores anaeróbios, visto que segundo Liu *et al.* (2012), a relação ideal varia de 0,3 a 0,4 para a manutenção do tamponamento, relação atingida para o RB, com AGV/AT de 0,14.

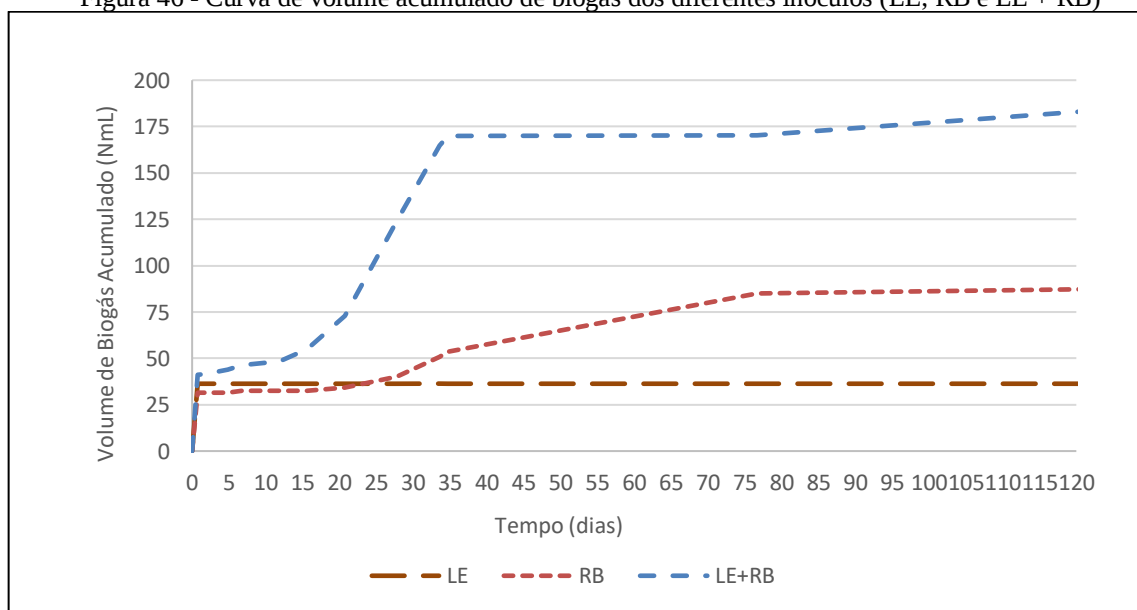
#### 4.6 AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA ATRAVÉS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BMP

O presente subtópico apresenta e discute os resultados dos ensaios de BMP em termos de volume acumulado, taxa de geração de biogás e análise cinética do potencial de geração de biogás.

##### 4.6.1 Resultados de Volume Acumulado e Taxa de Geração de Biogás dos inóculos

Os inóculos atuam na biodigestão anaeróbia visando garantir a disponibilidade de nutrientes e micro-organismos na degradação do substrato (Firmo, 2013), além de um aumento do pH do meio. Assim, em termos de produção de biogás, a Figura 46 apresenta o comportamento do lodo de ETE, do rúmen bovino e da combinação desses através do ensaio de BMP realizado em triplicata.

Figura 46 - Curva de volume acumulado de biogás dos diferentes inóculos (LE, RB e LE + RB)



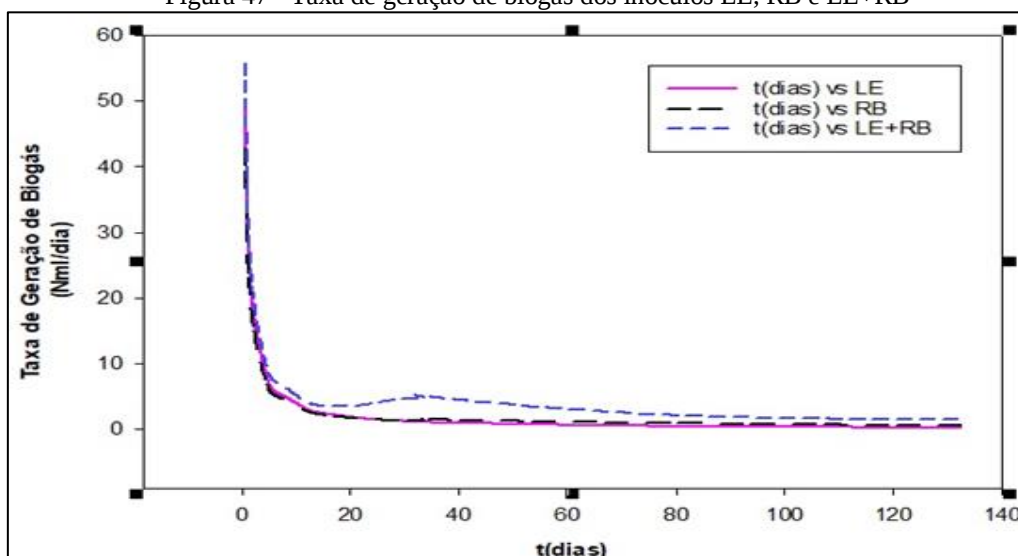
Fonte: A Autora (2023).

Observa-se que, ao longo do ensaio, o LE apresentou um comportamento linear e atingiu a estabilização, com um volume máximo de 36,38 NmL. Este resultado é considerado bem abaixo dos encontrados na literatura, tais como Santos (2019) que relatou um volume de 144,23 NmL. Segundo a autora, um volume elevado de biogás em lodos pode ser em decorrência da presença de material orgânico inerte agregado. Brito (2015) afirma ainda que o lodo pode apresentar diferenciações em decorrência de fatores como mudanças climáticas, forma de coleta, acondicionamento do lodo, local da coleta, dentre outros, não havendo uma padronização dos resultados dos mesmos. Magalhães (2018) e Andrade *et al.* (2015) encontraram resultados ainda menores, com um volume acumulado de aproximadamente 26,68 NmL e 10 NmL, respectivamente.

Já para o RB, o volume acumulado foi de 87,87 NmL em 133 dias de observação. O resultado mais significativo foi encontrado para a mistura de LE+RB, que atingiu um volume acumulado de 186,56 NmL. Holliger *et al.* (2016) afirmam que esta alternativa de misturar inóculos de diferentes fontes propicia um aumento na diversidade da comunidade microbiana.

Para todas as três condições de inóculos, a taxa máxima de geração de biogás ocorreu nas primeiras 24 horas após a incubação, seguindo uma tendência a estabilização, onde mais de 95% do total do biogás acumulado já havia sido produzido em 30 dias de experimento. Durante as primeiras 24hs de incubação, a taxa de produção de biogás foi de 69,76 NmL.g<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> para o LE, 61,19 NmL.g<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> para o RB e 79,55 NmL.g<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> para o LE+RB. A Figura 47 apresenta o comportamento da taxa de geração de biogás observada para os inóculos LE, RB e LE+RB.

Figura 47 - Taxa de geração de biogás dos inóculos LE, RB e LE+RB



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.6.2 Resultados de Volume Acumulado de Biogás do substrato+inóculo

A sinergia, que segundo Alves (2008), é definida quando o efeito total da ação combinada das substâncias é superior ao efeito das substâncias isoladamente foram avaliados para os resíduos de Pimentão, Beringela, Tomate, Laranja e Folhosos, em comparação com as amostras controle, ou seja, os inóculos em condição isolada, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Comparação dos resultados de volume máximo acumulado nas diferentes configurações de substrato+inóculo

| <b>Configuração</b> | <b>Volume Máximo Acumulado<br/>(NmL)</b> | <b>Situação em relação<br/>ao inóculo/controle<br/>(%)</b> |
|---------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>LE</b>           | 36,38                                    | -                                                          |
| <b>TOM + LE</b>     | 422,15                                   | + 1060,39                                                  |
| <b>LAR + LE</b>     | 251,19                                   | + 590,46                                                   |
| <b>BJL + LE</b>     | 240,68                                   | + 561,57                                                   |
| <b>PMT + LE</b>     | 327,28                                   | + 799,62                                                   |
| <b>FLS LE</b>       | 322,82                                   | +787,35                                                    |
| <b>RB</b>           | 87,87                                    | -                                                          |
| <b>TOM + RB</b>     | 167,14                                   | + 90,21                                                    |
| <b>LAR + RB</b>     | 343,97                                   | + 291,45                                                   |
| <b>BJL + RB</b>     | 166,19                                   | + 89,13                                                    |
| <b>PMT + RB</b>     | 127,35                                   | + 44,93                                                    |
| <b>FLS RB</b>       | 219,81                                   | + 150,15                                                   |
| <b>LE + RB</b>      | 186,56                                   | -                                                          |
| <b>TOM+LE+RB</b>    | 137,53                                   | - 26,28                                                    |
| <b>LAR+LE+RB</b>    | 149,64                                   | - 19,79                                                    |
| <b>BJL+LE+RB</b>    | 184,33                                   | - 1,20                                                     |
| <b>PMT+LE+RB</b>    | 187,52                                   | + 0,51                                                     |
| <b>FLS+LE+RB</b>    | 111,82                                   | - 40,06                                                    |

Fonte: A Autora (2023).

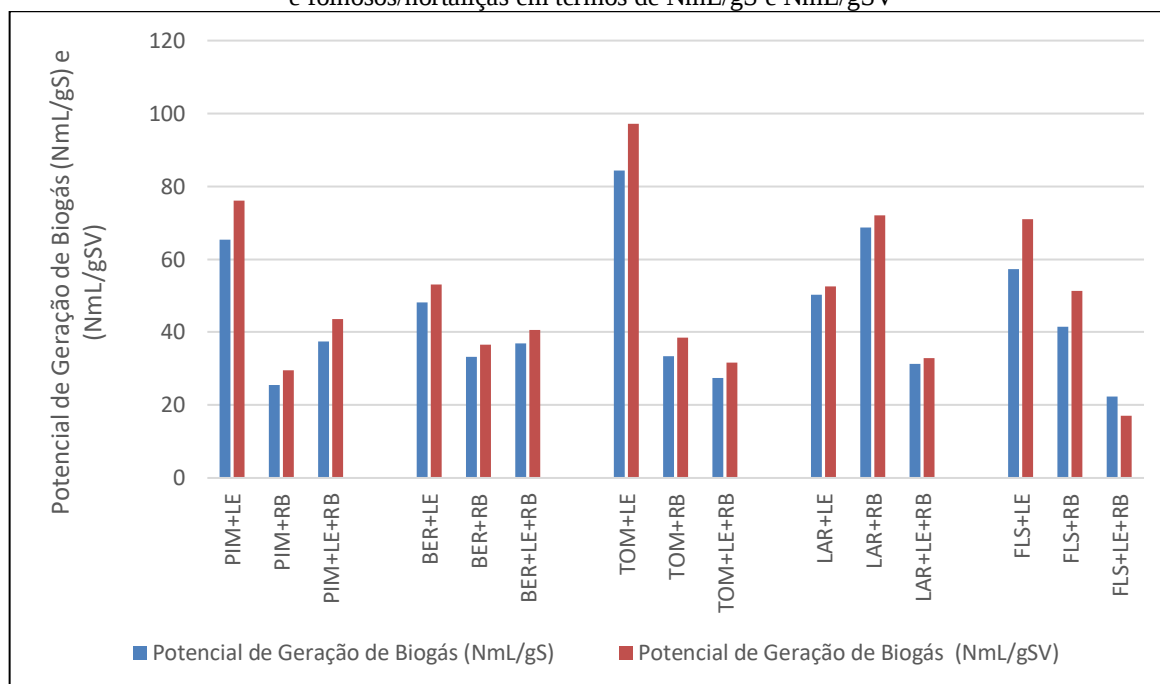
De acordo com a Tabela, foi observado um aumento do volume acumulado de biogás das configurações dos diferentes substratos na codigestão com o LE e com o RB quando comparados com as amostras controle (LE, RB e LE+RB), o que confirma que a adição de resíduos orgânicos com o inóculo otimiza o rendimento de biogás (ANDRADE, 2018). O volume acumulado apresentou um acréscimo de mais de 500% para todas as amostras quando em adição com o LE. Já em relação ao RB, o acréscimo foi menor, onde o valor máximo obtido foi para a configuração de LAR+RB que apresentou um acréscimo de 291,45%. Segundo Lucena (2016) a sinergia em geral é significativa quando comparado com o comportamento isolado tendo em vista existir uma complementaridade das características de cada componente.

O comportamento onde as configurações apresentavam a mistura de inóculos RB+LE foi adverso onde, em grande parte das configurações, os valores de volume acumulado foram inferiores a amostra controle (LE+RB), ou seja, houve uma diminuição percentual, exceto para a configuração de PMT+LE+RB, que apresentou um acréscimo de 0,51%, resultado bem abaixo quando comparado com a configuração PMT+LE (+799,62%) e PMT+RB (+44,93%). Este desempenho pode ter ocorrido em virtude da característica do inóculo de RB em termos de fibras, visto que segundo Orrico Jr *et al.* (2011), os dejetos dos ruminantes apresentam alta concentração de fibra e baixos potenciais de produção de biogás. Outro indicativo refere-se à quantidade de inóculo utilizado, visto que a mesma proporção poderá ter acometido uma inibição na produção de biogás.

#### **4.6.3 Potencial de produção de biogás dos resíduos de frutas e verduras provenientes do CEASA/PE – Recife**

A partir dos resultados de volume de biogás gerado apresentados anteriormente foi possível observar o potencial máximo de biogás atingido por cada configuração ao longo do tempo, em termos de NmL/gSeca e Nml/gSV. Para tanto, foi desconsiderada a fração de biogás gerada pelo inóculo (Figura 48).

Figura 48 - Comparação do Potencial de Geração de Biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças em termos de NmL/gS e NmL/gSV



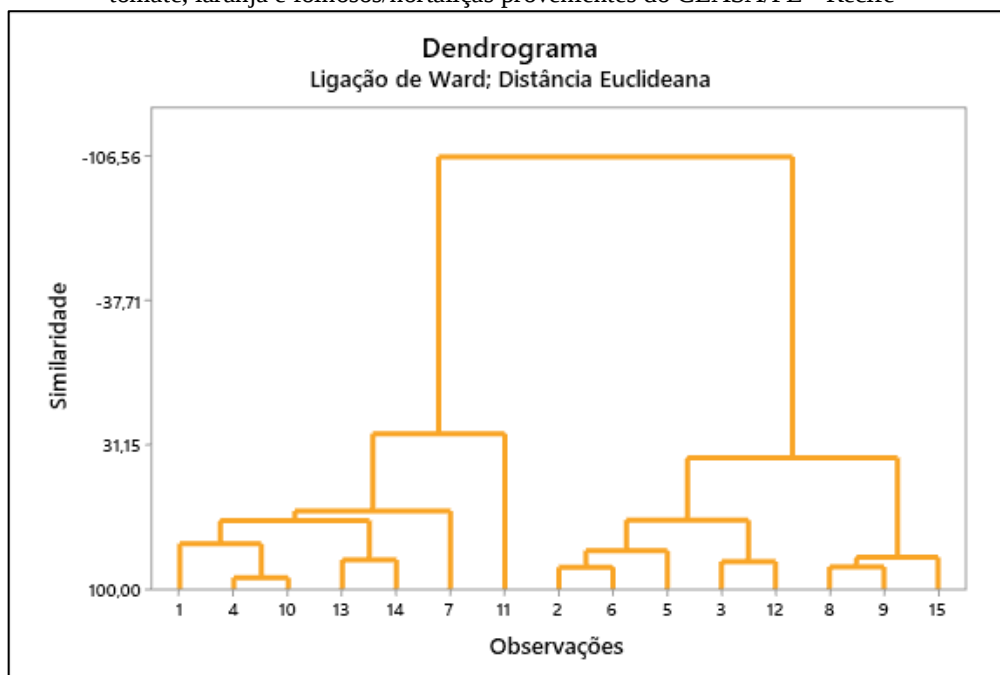
Fonte: A Autora (2023).

Para os resíduos de pimentão, beringela, tomate e folhosos, observou-se que as configurações com o inóculo LE obtiveram maiores resultados de potencial de biogás, onde a configuração TOM+LE destacou-se com potencial de geração de 84,43NmL/gS e 97,18NmL/gSV. Já a laranja obteve um maior potencial na configuração LAR+RB, com 68,79NmL/gS e 72,05NmL/gSV.

A configuração FLS+LE+RB apresentou um potencial de geração de biogás de 22,36NmL/gS e 17,04NmL/gSV, sendo esses os menores resultados obtidos no ensaio. Esses resultados inferiores quando comparado aos demais podem estar relacionados ao percentual elevado de lignina deste substrato. Porém, a ação combinada com o inóculo LE permitiu um aumento dessa produção, com resultados de produção de 57,30NmL/gS e 71,0NmL/gSV. Observa-se então que, no geral, não houveram diferenças significativas entre esses dois parâmetros para as configurações avaliadas.

A partir dos dados experimentais do potencial de geração de biogás (NmL/gS) foi realizada uma Análise de Agrupamentos (Cluster). Conforme pode ser observado na Figura 49, foram formados três grupos, considerando uma similaridade de 66,0. Destaca-se o grupo formado pelas combinações (1) 1, 4, 10, 13, 14 e 7 e (2) 2, 6, 5, 3 e 12, que representa 46% e 33% respectivamente das configurações estudadas.

Figura 49 - Análise de Cluster para o potencial de geração de biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (ano)

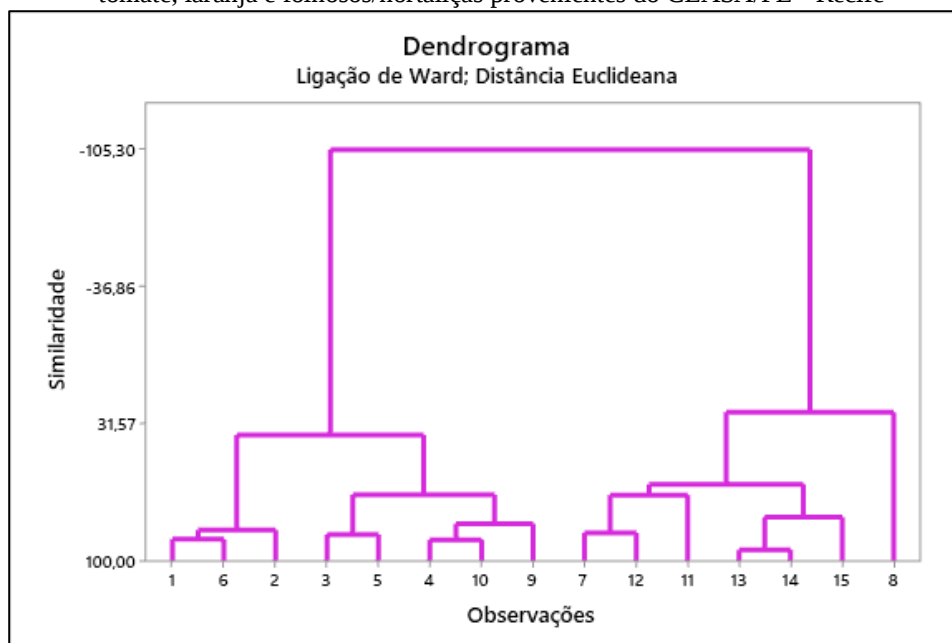
\*Legenda: 1. PIM+LE, 2. PIM+RB, 3. PIM+LE+RB; 4. BJL+LE, 5. BJL+RB, 6. BJL+LE+RB; 7. TOM+LE, 8. TOM+RB, 9. TOM+LE+RB; 10. LAR+LE, 11. LAR+RB, 12. LAR+LE+RB; 13. FLS+LE, 14. FLS+RB, 15. FLS+LE+RB

#### 4.6.4 Comportamento da Taxa Média de geração de biogás

Observa-se que para todas as combinações de substrato e inóculos, a taxa máxima de geração de biogás ocorreu nas primeiras 24 horas após a incubação, seguindo uma tendência a estabilização e tendendo a 0 após o 35º dia, similar ao reportado por Raposo *et al.* (2012), que afirma que o tempo de incubação para substratos orgânicos podem variar de 30 dias. A taxa máxima de produção de biogás para as configurações de LAR+LE, BER+LE e PIM+LE apresentaram o valor máximo (257,02 NmL/dia) em comparação as demais configurações. Já a taxa mínima foi observada após 133 dias para a configuração de PIM+RB (1,62 NmL/dia).

A Análise de Agrupamentos (Cluster) para a taxa de geração de biogás (NmL/dia) resultou em um agrupamento de três grupos, considerando uma similaridade de 66,0. Para tanto, destaca-se que apenas a configuração 8 (TOM+RB) não apresentou agrupamento significativo com nenhuma outra configuração (Figura 50).

Figura 50 - Análise de Cluster para a taxa de geração de biogás dos resíduos de pimentão, beringela, tomate, laranja e folhosos/hortaliças provenientes do CEASA/PE - Recife

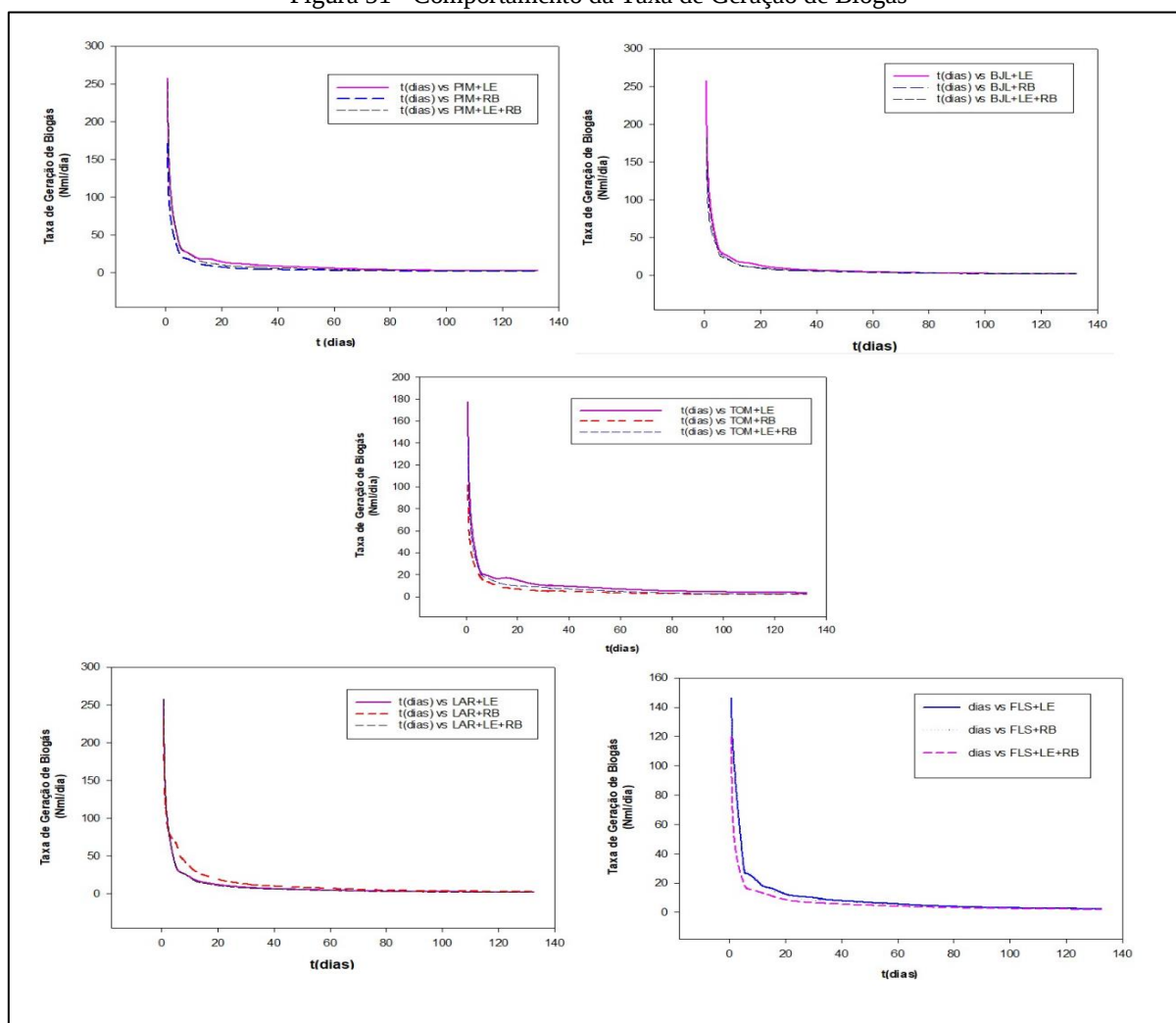


Fonte: A Autora (2023).

Legenda: 1. PIM+LE, 2. PIM+RB, 3. PIM+LE+RB; 4. BJL+LE, 5. BJL+RB, 6. BJL+LE+RB; 7. TOM+LE, 8. TOM+RB, 9. TOM+LE+RB; 10. LAR+LE, 11. LAR+RB, 12. LAR+LE+RB; 13. FLS+LE, 14. FLS+RB, 15. FLS+LE+RB

Apesar do potencial de geração de biogás ter sido maior para combinação de TOM+LE, os inóculos não são capazes de mudar a tendência da curva, mas sim catalisar a produção, majoritariamente, nos primeiros 7 dias (Figura 51). Ressalta-se ainda que, após 7 dias de ensaio, a taxa de produção de biogás diária em todas as configurações apresentou mais de 80% da produção inicial. Andrade (2018) e Santos (2019) reportaram períodos de estabilização em cerca de 10 dias para a produção de biogás. Já Edwiges (2017) identificou essa estabilização aos 16 dias do início do ensaio para resíduos de frutas e verduras.

Figura 51 - Comportamento da Taxa de Geração de Biogás



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.6.5 Avaliação do pH inicial e final dos ensaios de BMP

A avaliação do comportamento do pH no início e no final do experimento é de grande valia uma vez que o mesmo pode influenciar significativamente nas atividades executadas pelos micro-organismos acidogênicos e metanogênicos, podendo assim inibir a produção de biogás. O lodo estudado apresentou isoladamente um pH na fase neutra, aproximando-se da fase básica, após ajuste do pH com valor inicial entre 7,92– 8,00 e final com valores entre 7,44 – 7,84, considerando ter sido realizado o ensaio em triplicata. Lucena (2016), ao avaliar este parâmetro com o mesmo tipo de lodo anaeróbico encontrou um resultado similar a esta pesquisa, com pH inicial de 7,34. Já Valença (2017) obteve um resultado um pouco menor, com pH inicial de 6,67. Os inóculos de RB e LE+RB apresentaram comportamento similar com o comportamento inicial de 7,94 e 8,0, respectivamente. Santos (2019) afirma que esses

resultados são considerados satisfatórios para o desenvolvimento das *Archeas* Metanogênicas na digestão anaeróbia.

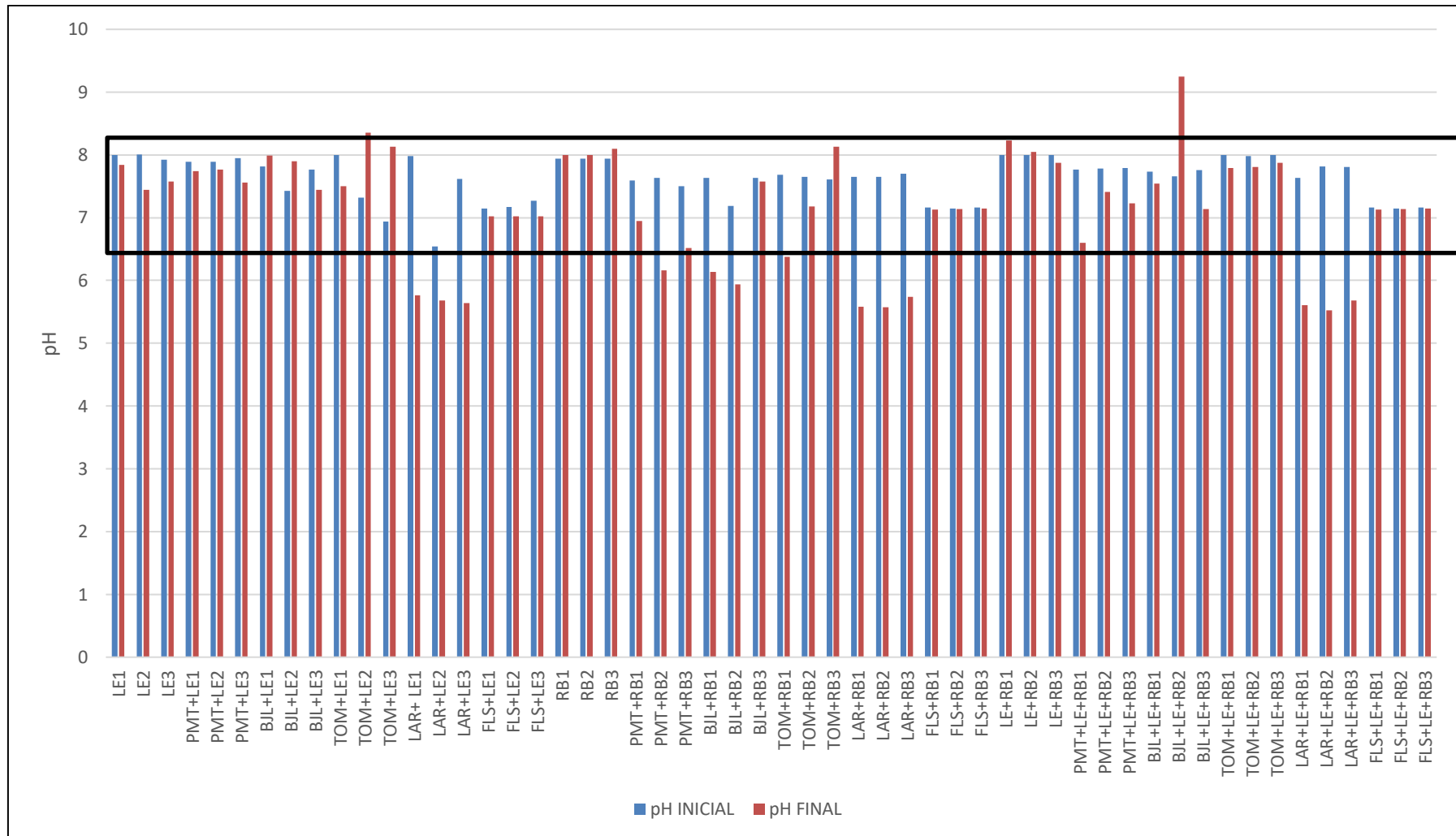
Como previsto, a adição de resíduos, com pH ácido, contribuiu para aumentar a acidez inicial nas diferentes configurações realizadas. A Figura 52 apresenta os valores de pH obtidos no início e no final dos experimentos de BMP. Segundo Chernicharo (1997), a faixa ideal para geração de metano apresenta pH entre 6,0 a 8,0, faixa essa indicada na Figura 52. Ao final dos 133 dias de experimento, observou-se que a solução alcalinizante e o tamponamento foram ideais em grande parte das configurações para manter o pH, porém, as configurações que continham a laranja, ou seja, LAR+LE, LAR+RB e LAR+LE+RB apresentaram redução de pH, finalizando com resultados variando entre 5,64 – 5,76, 5,58 – 5,74 e 5,52 – 5,68, respectivamente.

Santos (2019) ao realizar o estudo do potencial de geração de biogás para o bagaço de laranja em 60 dias e utilizando 2,16g de amostra como substrato e 26,5g de inóculo observou que não houve acidificação, com o pH final atingindo 7,10. Valença *et al.* (2021) afirma que o excesso ou a escassez de alcalinizante é prejudicial à digestão anaeróbia, independentemente da qualidade do inóculo utilizado.

Posteriormente, visando identificar o comportamento do pH dos resíduos de LAR+LE, LAR+RB e LAR+LE+RB em 7 dias de observação, visto essa ter sido a fase onde ocorreu maior geração de biogás dos resíduos, constatou-se que, não houve declínio do pH, com o resultado final atingindo valores de 7,10, 7,23 e 7,40 para cada configuração respectivamente.

Lucena (2016) e Valença (2017) mesmo após correção de pH com NaOH 30% e tamponamento com bicarbonato de 0,5g e 1,0g respectivamente constataram a acidificação do meio na sinergia do lodo com resíduos alimentares.

Figura 52 - Avaliação do pH inicial e final dos ensaios de BMP



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.6.6 Avaliação do Potencial Máximo de Geração de Biogás através de Modelos Cinéticos

Neste estudo foi ainda realizada uma análise de potencial máximo de geração de biogás através da utilização do software OriginPro 8.0, retirando-se a fração de biogás gerada pelos inóculos LE, RB e LE+RB do valor total gerado pela mistura do resíduo com os referidos inóculos. Para tanto, a cinética foi realizada a partir da regressão não linear, com a utilização de cinco diferentes modelos: (1) Primeira Ordem; (2) Logístico Modificado; (3) Gompertz Modificado; (4) Modelo de Cone e (5) Modelo de Fitzugh.

Segundo Moraes (2019), a literatura internacional apresenta quatorze diferentes tipos de modelos matemáticos que podem ser utilizados para prever o comportamento de sistemas anaeróbios quanto à biodegradação, porém, ainda não existe uma definição sobre qual o modelo deve ser utilizado para cada diferente tipo de substrato.

A Figura 53 apresenta o comportamento das diferentes configurações estudadas, onde observa-se que, para todos os modelos, as curvas se ajustaram de forma satisfatória. Porém, para todos os experimentos com as configurações com inóculo LE+RB, foi realizado o estudo com os resultados de 15 dias, tendo em vista que o comportamento apresentou alterações durante os 133 dias de ensaios.

Essas alterações indicaram inicialmente uma fase inibitória do processo, onde o volume de biogás apresentou um decréscimo a partir do 16º dia de experimento em todos os reatores com esta configuração. Ao analisar o volume máximo acumulado dos diferentes inóculos, observou-se que, o inóculo LE atingiu 36,29 NmL e o inóculo RB 87,87 NmL. Já a sinergia entre esses inóculos atingiu 190,06 NmL. Neste sentido, o mesmo volume de inóculo utilizado pode ter sido favorável ao efeito inibitório da comunidade microbiana, visto que, isoladamente, os inóculos apresentaram diferentes graus de digestibilidade pelos micro-organismos que podem ter influenciado no comportamento da produção de biogás.

Edwiges (2017) reportou resultados ainda menores nos estudos de resíduos de frutas e verduras (0,39 e 0,66 dia<sup>-1</sup>). Já Zhao *et al.* (2016) apresentou valores entre (0,02 a 0,10 dia<sup>-1</sup>) para modelos de primeira ordem, (0,01 a 0,16 dia<sup>-1</sup>) para modelo de Cone e (0,03 a 0,11 dia<sup>-1</sup>) para o modelo de Fitzhugh (0,03 a 0,11 dia<sup>-1</sup>) ao analisar a cinética de diferentes resíduos de frutas durante a digestão anaeróbica descontínua. A análise da mesma constante em dejetos suínos e bovinos, Pham *et al.* (2013) identificaram uma constante de degradação da ordem de 0,149 d<sup>-1</sup> e 0,106 d<sup>-1</sup>, respectivamente.

Um valor de  $k$  mais alto implica uma maior taxa de degradação (Zhao *et al.*, 2016). Assim, considerando os valores de  $k$  obtidos através do modelo de Cone, observa-se que, os resultados mais elevados foram dos cenários de BER+RB (1,055), e FLS+RB (0,774). Esses valores mais elevados podem ter ocorrido em decorrência do alto teor de carboidrato e baixo teor de lignina dos substratos.

A taxa máxima de geração de biogás variou entre 1,35 NmL.dia<sup>-1</sup> (TOM+RB) a 5,24 NmL.dia<sup>-1</sup> (PIM+RB) para o modelo de Gompertz modificado e entre 15,359 NmL.dia<sup>-1</sup> (LAR+RB) a 0,783 NmL.dia<sup>-1</sup> (TOM+RB). Santos *et al.* (2022) obteve resultado similar ao observar a taxa de produção de biogás para resíduos de laranja ensilados no modelo Logístico modificado variando entre 3,213 e 8,814 N mL·dia<sup>-1</sup>.

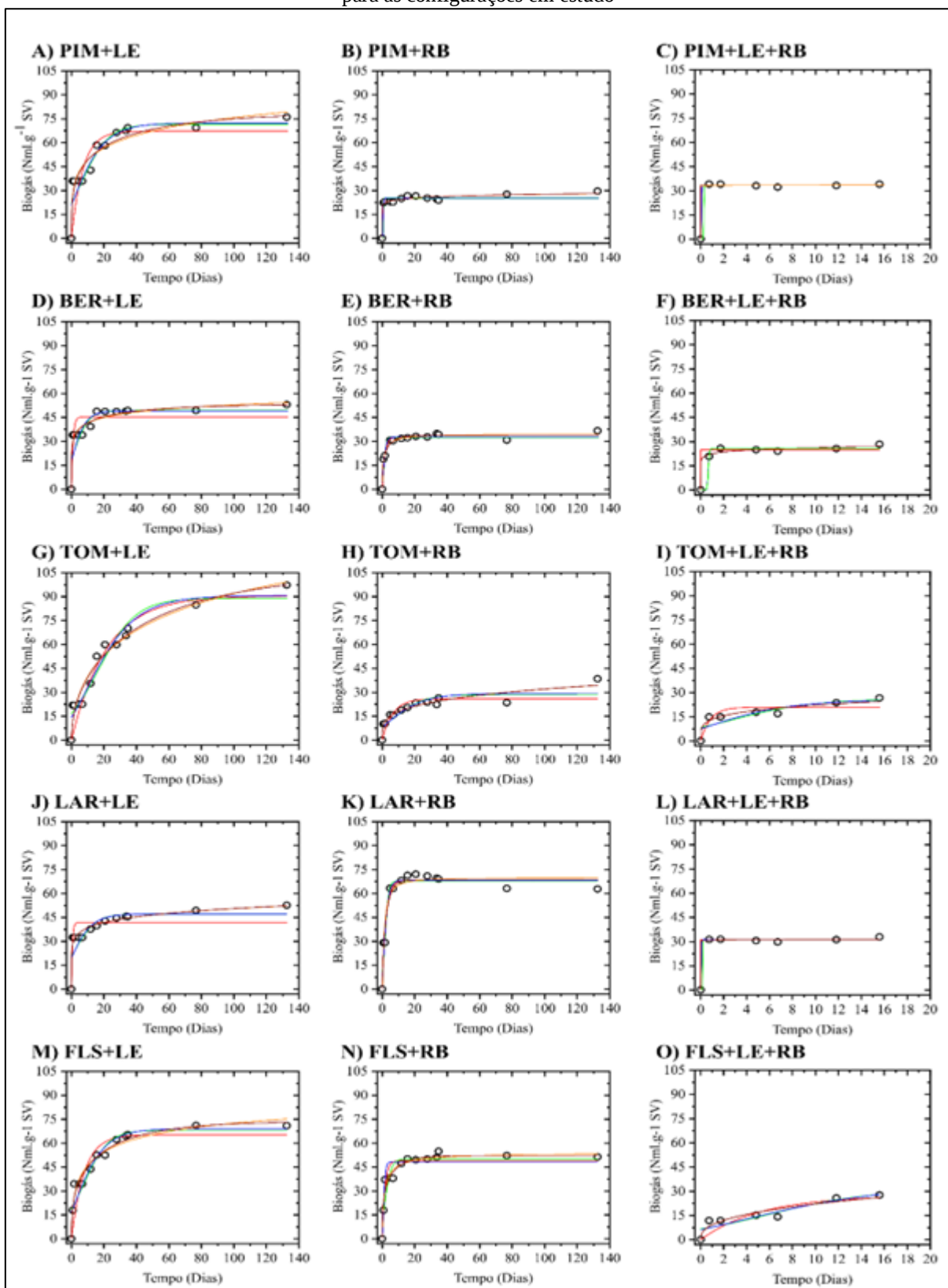
Os modelos de Fitzhugh e de Cone apresentam uma constante de forma ( $n$ ) que indica a presença ( $n \geq 1$ ) ou não ( $n < 1$ ) da fase lag (MORAIS, 2019). Neste sentido, com base nesses modelos, apenas as configurações BER+LE+RB (13,756) e LAR+RB (1,338) apresentaram a fase lag.

O valor de  $\lambda$  que é o tempo de latência quanto a produção de biogás apresentou valores menores que 1. Esta inexistência da fase lag, indica uma boa biodegradabilidade dos substratos. O cenário PIM+RB apresentou os maiores valores de  $\lambda$  para o modelo Logístico (0,525 dia) e modelo de Gompertz modificado (0,15939 dia), o que pode ser justificado pelo alto percentual de lignina do substrato (33,5%) e baixa relação  $((C+H)/L)$  de 0,25 indicando uma difícil degradação quando comparado aos demais resíduos em estudo.

Após esse período de defasagem inicial, observou-se um aumento exponencial, não sendo definida uma estabilização final durante o período de 133 dias. Segundo Pelleria *et al.* (2016), quando na ocorrência de metano em fases distintas, indica-se a utilização de uma abordagem de modelagem diferente da utilizada nesta pesquisa, assumindo a ocorrência de estágios múltiplos.

Donoso-Bravo *et al.* (2010), Li *et al.* (2012), Rincón *et al.* (2013) e Pelleria *et al.* (2016) sugerem o sistema Primeira Ordem + Logístico Modificado, visto que, o modelo exponencial de primeira ordem é comumente aplicável a substratos facilmente biodegradáveis e o modelo sigmoidal ou logístico realizaria a modelagem para o lag e o segundo estágio com suas três fases características, ou seja, lag, aumento exponencial e etapa final de estabilização.

Figura 53 - Comparação do comportamento do potencial de geração de biogás em diferentes modelos cinéticos para as configurações em estudo



Fonte: A Autora (2023).

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise cinética dos modelos de forma detalhada, onde é possível observar que, em sua grande maioria a análise dos valores dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) apresentou-se maior que 0,9, o que indica uma forte correlação dos dados, porém, os Modelos de Cone e de Fitzhugh se destacaram quanto a este parâmetro, com resultados superiores a 0,9 em todas as configurações, o que sugere que o processo de produção de biogás desses resíduos pode ser melhor descrito por esses dois modelos. Segundo Da Silva *et al.* (2018), o modelo cinético torna-se satisfatório quando os valores de  $R^2$  das curvas estão acima de 0,80.

Santana (2023), ao avaliar diferentes configurações utilizando biofertilizante líquido e rúmen como inóculo e uma mistura de resíduos orgânicos como substrato, identificou que para todas as configurações estudadas as curvas de potencial de metano apresentaram ajuste adequado para os modelos de Gompertz modificado, Logístico e Primeira Ordem, onde o  $R^2$ , apresentou variações entre 0,87 a 0,99, e  $RMSE$  variando entre 3,0816 a 0,0340.

No que concerne aos resultados quanto à constante de degradação  $k$ , parâmetro diretamente relacionado à velocidade de degradação dos resíduos, observou-se diferentes variações quanto aos modelos, onde para o modelo de Primeira Ordem a variação foi de 0,046  $\text{dia}^{-1}$  (TOM+LE) à 1,937  $\text{dia}^{-1}$  (PIM+RB), entre 0,00  $\text{dia}^{-1}$  à 1,055  $\text{dia}^{-1}$  (BER+RB) no modelo de Cone e entre 0,00  $\text{dia}^{-1}$  a 0,327  $\text{dia}^{-1}$  (LAR+RB) no modelo de Fitzhugh.

Tabela 17 - Parâmetros cinéticos e estatísticos dos modelos para as diferentes configurações em estudo

| Configuração     | Modelo            | $y_m$<br>(NmL.g <sup>-1</sup> VS) | $k$<br>(d <sup>-1</sup> ) | $\mu$<br>(NmL.d <sup>-1</sup> ) | $\Lambda$<br>(d) | $n$   | $R^2$ |
|------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|-------|-------|
| <b>PIM+LE</b>    | First Order       | 67,30                             | 0,146                     | –                               | –                | –     | 0,717 |
|                  | Modified Logistic | 71,58                             | –                         | 2,164                           | 10,009           | –     | 0,822 |
|                  | Modified Gompertz | 72,27                             | –                         | 2,01284                         | 8,50815          | –     | 0,829 |
|                  | Cone              | 160,27                            | 0,007                     | –                               | –                | 0,306 | 0,915 |
|                  | Fitzhugh          | 78,79                             | 0,017                     | –                               | –                | 0,259 | 0,924 |
| <b>PIM+RB</b>    | First Order       | 25,36                             | 1,937                     | –                               | –                | –     | 0,921 |
|                  | Modified Logistic | 25,27                             | –                         | 53,095                          | 0,525            | –     | 0,910 |
|                  | Modified Gompertz | 25,29                             | –                         | 5,24375                         | 0,15939          | –     | 0,910 |
|                  | Cone              | 101,42                            | 0,000                     | –                               | –                | 0,071 | 0,967 |
|                  | Fitzhugh          | 44,53                             | 0,000                     | –                               | –                | 0,054 | 0,968 |
| <b>PIM+LE+RB</b> | First Order       | 33,48                             | 2712,648                  | –                               | –                | –     | 0,997 |
|                  | Modified Logistic | 33,48                             | –                         | 442,370                         | 0,235            | –     | 0,996 |
|                  | Modified Gompertz | 33,48                             | –                         | 14,96159                        | 0,0365           | –     | 0,996 |
|                  | Cone              | 45,26                             | 1,46E+4<br>2              | –                               | –                | 0,011 | 0,995 |
|                  | Fitzhugh          | 33,64                             | 0,000                     | –                               | –                | 0,000 | 0,996 |
| <b>BER+LE</b>    | First Order       | 45,31                             | 1,026                     | –                               | –                | –     | 0,782 |

|                  |                   |        |          |          |         |        |       |
|------------------|-------------------|--------|----------|----------|---------|--------|-------|
|                  | Modified Logistic | 49,37  | –        | 2,805    | 6,813   | –      | 0,669 |
|                  | Modified Gompertz | 49,20  | –        | 2,35068  | 4,67311 | –      | 0,686 |
|                  | Cone              | 92,54  | 0,039    | –        | –       | 0,214  | 0,938 |
|                  | Fitzhugh          | 53,42  | 0,020    | –        | –       | 0,146  | 0,943 |
| <b>BER+RB</b>    | First Order       | 32,92  | 0,633    | –        | –       | –      | 0,954 |
|                  | Modified Logistic | 32,69  | –        | 11,241   | 0,214   | –      | 0,899 |
|                  | Modified Gompertz | 32,73  | –        | 3,62165  | 0,19348 | –      | 0,921 |
|                  | Cone              | 34,80  | 1,055    | –        | –       | 0,949  | 0,971 |
|                  | Fitzhugh          | 33,61  | 0,214    | –        | –       | 0,372  | 0,971 |
| <b>BER+LE+RB</b> | First Order       | 24,98  | 4,18E+08 | –        | –       | –      | 0,934 |
|                  | Modified Logistic | 25,82  | –        | 138,221  | 0,582   | –      | 0,973 |
|                  | Modified Gompertz | 25,82  | –        | 8,63759  | 0,55552 | –      | 0,973 |
|                  | Cone              | 25,82  | 1,495    | –        | –       | 13,756 | 0,973 |
|                  | Fitzhugh          | 44,22  | 4,60E-05 | –        | –       | 0,068  | 0,967 |
| <b>TOM+LE</b>    | First Order       | 90,45  | 0,046    | –        | –       | –      | 0,913 |
|                  | Modified Logistic | 88,96  | –        | 1,938    | 6,163   | –      | 0,922 |
|                  | Modified Gompertz | 90,69  | –        | 1,86397  | 6,48963 | –      | 0,938 |
|                  | Cone              | 185,51 | 0,010    | –        | –       | 0,556  | 0,949 |
|                  | Fitzhugh          | 105,62 | 0,014    | –        | –       | 0,488  | 0,954 |
| <b>TOM+RB</b>    | First Order       | 26,02  | 0,156    | –        | –       | –      | 0,710 |
|                  | Modified Logistic | 28,50  | –        | 0,783    | 10,590  | –      | 0,714 |
|                  | Modified Gompertz | 29,29  | –        | 1,3594   | 9,50892 | –      | 0,737 |
|                  | Cone              | 599,13 | 1,70E-07 | –        | –       | 0,262  | 0,917 |
|                  | Fitzhugh          | 227,39 | 4,22E-06 | –        | –       | 0,252  | 0,917 |
| <b>TOM+LE+RB</b> | First Order       | 20,91  | 1,205    | –        | –       | –      | 0,767 |
|                  | Modified Logistic | 26,06  | –        | 1,842    | 4,399   | –      | 0,578 |
|                  | Modified Gompertz | 25,81  | –        | 1,95874  | 3,30937 | –      | 0,603 |
|                  | Cone              | 642,09 | 3,78E-08 | –        | –       | 0,225  | 0,916 |
|                  | Fitzhugh          | 149,89 | 1,61E-05 | –        | –       | 0,219  | 0,917 |
| <b>LAR+LE</b>    | First Order       | 41,82  | 1,592    | –        | –       | –      | 0,756 |
|                  | Modified Logistic | 47,21  | –        | 1,825    | 11,186  | –      | 0,615 |
|                  | Modified Gompertz | 47,28  | –        | 1,97178  | 8,34649 | –      | 0,630 |
|                  | Cone              | 456,69 | 0,000    | –        | –       | 0,131  | 0,969 |
|                  | Fitzhugh          | 123,31 | 0,000    | –        | –       | 0,119  | 0,970 |
| <b>LAR+RB</b>    | First Order       | 68,32  | 0,449    | –        | –       | –      | 0,953 |
|                  | Modified Logistic | 67,84  | –        | 15,359   | 0,348   | –      | 0,930 |
|                  | Modified Gompertz | 68,11  | –        | 3,99581  | 0,41438 | –      | 0,938 |
|                  | Cone              | 69,84  | 0,725    | –        | –       | 1,338  | 0,933 |
|                  | Fitzhugh          | 68,69  | 0,327    | –        | –       | 0,708  | 0,954 |
| <b>LAR+LE+RB</b> | First Order       | 31,17  | 1,25E+07 | –        | –       | –      | 0,992 |
|                  | Modified Logistic | 31,17  | –        | 653,073  | 0,146   | –      | 0,991 |
|                  | Modified Gompertz | 31,17  | –        | 15,53506 | 0,02942 | –      | 0,991 |
|                  | Cone              | 65,22  | 6,67E-06 | –        | –       | 0,009  | 0,991 |
|                  | Fitzhugh          | 32,88  | 1,62E-06 | –        | –       | 0,005  | 0,991 |
| <b>FLS+LE</b>    | First Order       | 65,28  | 0,129    | –        | –       | –      | 0,837 |

|                  |                   |       |          |         |         |       |       |
|------------------|-------------------|-------|----------|---------|---------|-------|-------|
|                  | Modified Logistic | 68,20 | –        | 2,246   | 7,775   | –     | 0,870 |
|                  | Modified Gompertz | 68,99 | –        | 2,03164 | 6,65575 | –     | 0,885 |
|                  | Cone              | 99,19 | 0,075    | –       | –       | 0,498 | 0,955 |
|                  | Fitzhugh          | 73,73 | 0,028    | –       | –       | 0,342 | 0,965 |
| <b>FLS+RB</b>    | First Order       | 49,05 | 0,604    | –       | –       | –     | 0,908 |
|                  | Modified Logistic | 50,06 | –        | 6,543   | 1,856   | –     | 0,815 |
|                  | Modified Gompertz | 48,29 | –        | 4,78558 | 0,09479 | –     | 0,884 |
|                  | Cone              | 54,42 | 0,774    | –       | –       | 0,823 | 0,956 |
|                  | Fitzhugh          | 52,26 | 0,103    | –       | –       | 0,317 | 0,955 |
| <b>FLS+LE+RB</b> | First Order       | 27,43 | 0,191    | –       | –       | –     | 0,720 |
|                  | Modified Logistic | 31,26 | –        | 1,735   | 3,129   | –     | 0,764 |
|                  | Modified Gompertz | 34,35 | –        | 1,76305 | 3,45255 | –     | 0,771 |
|                  | Cone              | 41,33 | 1,11E-07 | –       | –       | 0,381 | 0,867 |
|                  | Fitzhugh          | 52,16 | 2,39E-05 | –       | –       | 0,379 | 0,867 |

Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7 SISTEMA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DO CEASA/PE - RECIFE

O sistema de digestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE - Recife opera em condições mesofílica, com o comportamento durante todo o tempo de controle do processo apresentando variações, principalmente em virtude da heterogeneidade do material inserido. A Figura 54 apresenta resumidamente os principais pontos observados nas diferentes fases do processo, destacando-se situações de grande relevância desde o *start* da planta até o colapso do sistema em virtude do aumento de carga.

Figura 54 - Diferentes fases do processo do sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE - Recife



Fonte: A Autora (2023).

Destaca-se que o efetivo controle da alimentação do sistema de biodigestão anaeróbia em escala piloto foi determinante para a interpretação dos dados obtidos, bem como aos ajustes necessários ao sistema.

A Tabela 18 apresenta os resultados de forma detalhada dos diferentes tipos de resíduos, quantidade de entrada de material (de resíduos, lodo, rúmen, chorume e digestato), quantidade de saída de digestato, pH, volume acumulado e CH<sub>4</sub> obtidos na operação do sistema de digestão anaeróbia instalado no CEASA/PE - Recife, monitorado durante um período de cerca de 16 meses. É relevante acrescentar que, o preenchimento do sistema de biodigestão era realizado de segunda à sexta-feira, no período da manhã, mantendo uma agitação contínua por um período de aproximadamente 4hs.

Tabela 18 - Fase, ocorrência e comportamento dos parâmetros analisados no sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE – Recife entre os anos de 2020 e 2022

| FASE | Período                      | Dias | Tipo de Resíduos                                                                                                                                               | Entrada de Resíduos (kg) | Entrada de Lodo (m³) | Entrada de Rúmen (kg) | Entrada de Chorume (mL) | Recirculação de Digestato | Saída de Digestato (l) | pH          | Volume Acumulado de Biogás (m³) | CH <sub>4</sub> (%) |
|------|------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------|
| I    | De 11.nov.2020 a 23.nov.2020 | 12   | Laranja, Pimentão, Maxixe, Beterraba e Batata                                                                                                                  | 835,0                    | 4,5                  | 0                     | 0                       | 0                         | 0                      | 4,87 – 6,5  | 2,1                             | -                   |
| II   | De 24.nov.2020 a 29.jan.2021 | 66   | Laranja, Pimentão, Tomate, Melancia, Melão, Cebola, Acerola, Mamão, Cenoura, Berinjela, Limão, Folhosos                                                        | 2.074,0                  | 0                    | 1.600                 | 4.410,0                 | 0                         | 2.500                  | 5,03 – 7,6  | 41,6                            | 29 - 88             |
| III  | De 30.jan.2021 a 07.abr.2021 | 67   | Laranja, Pimentão, Tomate, Melancia, Acerola, Batata, Limão, Goiaba                                                                                            | 1.599,0                  | 0                    | 0                     | 2.100,0                 | 0                         | 5.000                  | 6,35 – 7,33 | 191,64                          | 48 - 89             |
| IV   | De 08.abr.2021 a 04.dez.2021 | 240  | Laranja, Pimentão, Tomate, Melancia, Melão, Maxixe, Cebola, Batata, Mamão, Cenoura, Berinjela, Limão, Manga, Pepino, Abobrinha, Abacaxi, Chuchu, Quiabo, Jiló, | 4.367,0                  | 0                    | 60                    | 5.335,0                 | 475,0                     | 10.500                 | 6,80 – 8,54 | 519,14                          | 47 - 94             |

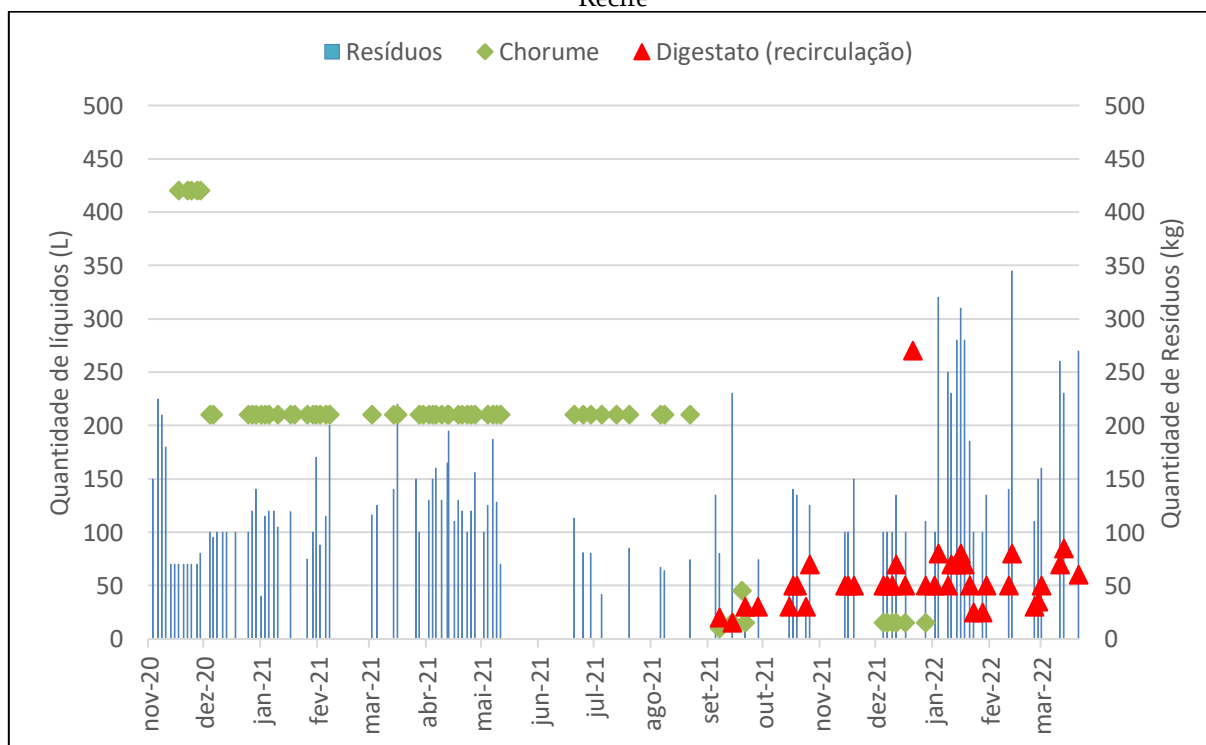
|           |                                 |    |                                                                                                 |         |   |   |      |         |       |             |        |              |
|-----------|---------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---|---|------|---------|-------|-------------|--------|--------------|
|           |                                 |    | Abóbora, Abacate                                                                                |         |   |   |      |         |       |             |        |              |
| <b>V</b>  | 05.dez.2021<br>a<br>28.jan.2022 | 54 | Laranja, Pimentão,<br>Tomate, Melancia,<br>Melão, Cebola,<br>Beterraba, Batata,<br>Mamão, Limão | 2.415,0 | 0 | 0 | 90,0 | 1.060,0 | 5.000 | 5,81 – 8,52 | 542,62 | 53 – 86      |
| <b>VI</b> | 29.jan.2022<br>a<br>30.mar.2022 | 60 | Laranja, Pimentão,<br>Tomate, Melancia,<br>Mamão, Limão,<br>Pepino, Abacate                     | 2.185,0 | 0 | 0 | 0    | 610,0   | 5.000 | 6,53 – 6,79 | 567,83 | 15,6 –<br>54 |

Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7.1 Preenchimento da planta de biodigestão anaeróbia

Para o funcionamento da planta de biodigestão, foram inoculados e aclimatados inicialmente 4,5 m<sup>3</sup> de lodo anaeróbio provenientes da ETE Mangueira. Após dois dias, iniciou-se o preenchimento dos reatores com resíduos de frutas e verduras de forma gradual, visando evitar o colapso do sistema e não sobrecarregar o reator, onde a quantidade mínima inserida foi de 40kg e a máxima atingiu 345kg. Para o auxílio da trituração dos resíduos foram utilizados o chorume proveniente dos caminhões de coleta de resíduos do CEASA/PE - Recife e posteriormente o digestato (subproduto do sistema). A Figura 55 apresenta o preenchimento dos resíduos com base nas quantidades de resíduos, chorume e digestato.

Figura 55 - Preenchimento do sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE - Recife



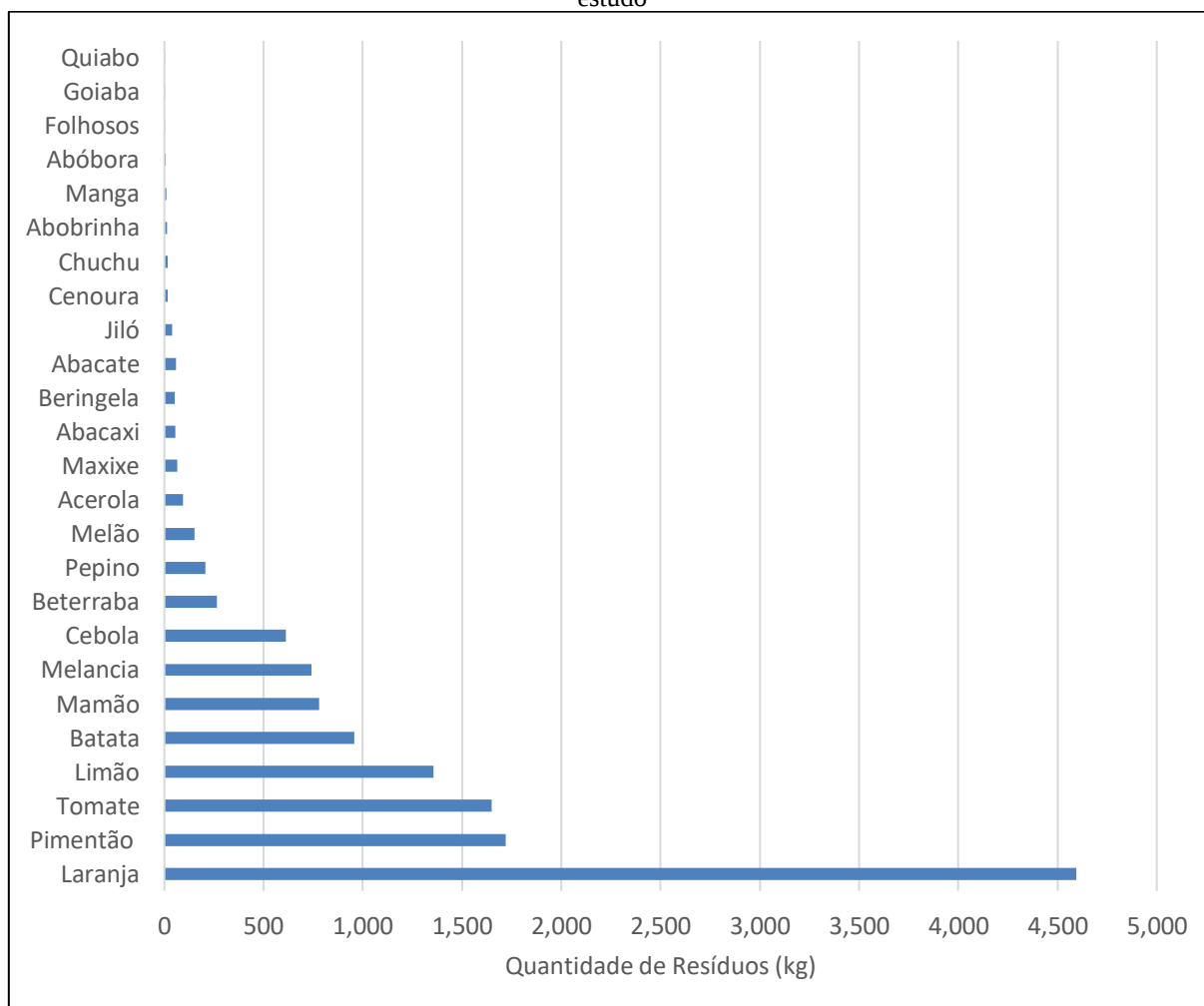
Fonte: A Autora (2023).

A composição dos resíduos era comumente realizada antes da entrada dos mesmos no sistema de biodigestão (Figura 56), onde observou-se que os resíduos de laranja, pimentão e tomate apresentaram os maiores percentuais quando comparado a quantidade total de resíduos no interior do biodigestor, correspondendo a 34,11%, 12,77% e 12,23% respectivamente, do total de resíduos preenchidos no reator para o período, corroborando o cenário observado durante as composições mensais, onde esses três tipos de resíduos juntamente com a beringela

e os folhosos participaram com uma frequência de aparecimento de 100% durante as análises de composições mensais. É importante destacar que, esta variedade para o preenchimento dos resíduos no reator anaeróbio era dependente da sazonalidade, desperdício e disponibilidade dos resíduos destinados ao processamento na planta piloto.

Apesar dos folhosos/hortaliças apresentarem-se como resíduos de grande proporção em todas as composições gravimétricas realizadas, durante o preenchimento do reator com esse tipo de material, observou-se alguns obstáculos, em especial no que tange ao funcionamento do triturador. Neste sentido, mesmo após alguns ajustes na planta verificou-se a limitação no dimensionamento da mesma para o recebimento deste componente, tendo em vista a dificuldade de trituração deste tipo de material.

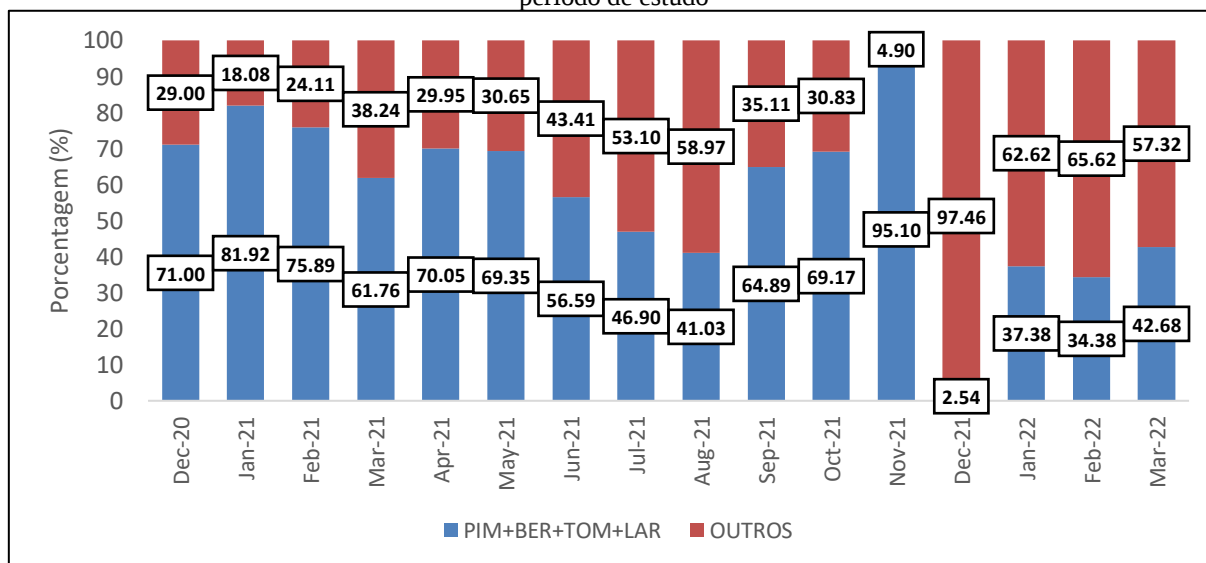
Figura 56 - Composição geral dos resíduos de frutas e verduras inseridos no biodigestor anaeróbio no período de estudo



Fonte: A Autora (2023).

A representatividade da quantidade dos resíduos analisados isoladamente em termos de potencial de geração de biogás – pimentão, beringela, tomate e laranja – revelou que, em termos de contribuição para o preenchimento do biodigestor, a soma desses resíduos foi responsável pelo maior percentual triturado no biodigestor na maioria dos meses. A exceção foi o mês de dezembro/2021, onde os demais resíduos representaram 97,46% do material destinado ao digestor (Figura 57).

Figura 57 - Comparação dos resíduos utilizados no preenchimento do sistema de biodigestão anaeróbia durante o período de estudo



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7.2 Avaliação do monitoramento dos parâmetros ambientais no biodigestor

Este subitem apresenta e discute os resultados em termos de pH, umidade, sólidos voláteis, DQO, taxa de geração de biogás e composição do biogás do sistema de biodigestão anaeróbia.

##### 4.7.2.1 Comportamento do pH no sistema de biodigestão anaeróbia

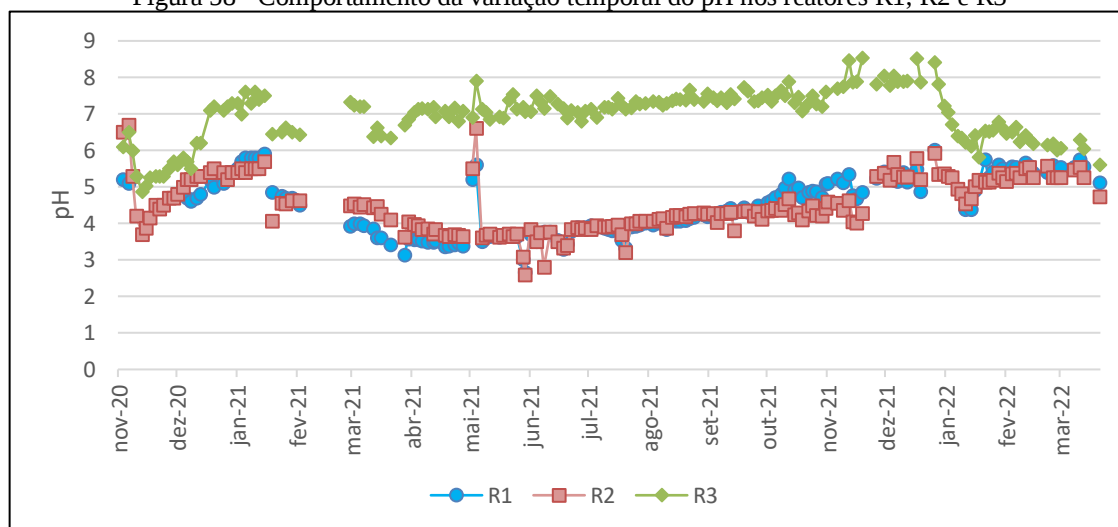
Os resultados de pH é um indicador de grande relevância para avaliar a estabilidade dos sistemas de digestão anaeróbia, visto que, para a produção de biogás é fundamental a realização do controle do pH, uma vez que as bactérias metanogênicas são sensíveis a um pH ácido. O inóculo de lodo proveniente de ETE apresentava inicialmente um pH de 7,10 na chegada à planta de biodigestão. Após o aporte de resíduos ao sistema, foi observado um decaimento deste pH nos reatores, atingido um valor mínimo de 2,66 para o reator R1, 3,87

para o reator R2, e 4,87 para o reator R3 ao final de novembro/2021. Os reatores 1 e 2 são referentes a etapas preliminares da digestão anaeróbia (hidrólise/acidogênese), sendo característico um pH mais ácido. Esses dois reatores não receberam nenhum aporte externo de ajuste de pH, permanecendo a acidificação da matéria orgânica.

Para tanto, visando evitar ainda mais o decaimento do pH do meio em virtude da acidez observada anteriormente em cada resíduo, bem como aumentar a concentração de micro-organismos, foram realizados três aportes mensais com rúmen bovino ao reator R3, material este considerado adaptado a digestão de resíduos orgânicos (KHALID *et al.*, 2011). A indicação da fase inibitória ao processo quando os dois inóculos (LE+RB) apresentavam a mesma quantidade nos ensaios de BMP foi determinante para a definição quanto ao aporte do rúmen, ou seja, observou-se a importância de uma menor quantidade deste material para a digestão anaeróbia quando com o lodo. Neste sentido, o aporte foi realizado de forma gradativa, totalizando 1.660 kg deste inóculo, observando assim que, o pH voltou lentamente ao normal. O reator 3 por ser a etapa mais importante do processo em decorrência da formação de metano deve-se manter na faixa entre 6 e 8.

Tian *et al.* (2015) ao avaliar a codigestão anaeróbia de resíduos de cozinha e esterco de porco em diferentes proporções verificou que, esta alternativa apresentava-se como viável para inibir a acidificação excessiva para teores de resíduos menores que 50%. Assim, foi verificada a reação ao meio e a retomada ao pH ideal do sistema, conferindo um pH médio variando entre 7,01 e 8,00 no reator R3, que segundo a literatura (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; CHERNICHARO, 1997; LIU *et al.*, 2015 e SLOPIECKA *et al.*, 2022) apresenta-se como aceitável do ponto de vista da digestão anaeróbia. Entre os meses de novembro/2021 e janeiro/2022, resultados de pH maiores que 8,0 foram apresentados ao sistema (Figura 58). Apesar de esses resultados não serem ideias, conforme indicado por LIU *et al.* (2011) e Santos (2019), não foram apresentados desequilíbrios até a correção ao valor ideal.

Figura 58 - Comportamento da variação temporal do pH nos reatores R1, R2 e R3



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7.2.2 Comportamento dos percentuais de umidade e sólidos voláteis no sistema de biodigestão anaeróbia

A Tabela 19 apresenta os resultados de umidade e sólidos voláteis da biomassa dos três reatores do sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE - Recife. Em termos de umidade, observa-se que os resultados apresentaram variações entre 93,22 e 98,27%, valores considerados ideais para a biodigestão, visto que, segundo Lay *et al.* (1997), o aumento do teor de umidade inicial de digestores anaeróbicos de 90 para 96% aumentou a atividade metanogênica na digestão de lodo com alto teor de sólidos. Em termos de taxa de produção de biogás, a mesma é dependente da concentração de sólidos e características dos substratos. Quanto aos percentuais de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais, os percentuais variaram entre 82,43-93,60 para o R1, 80,12-97,01 para o R2 e 64,49-83,79 para o R3.

Tabela 19 - Variação temporal da umidade e dos sólidos voláteis nos reatores R1, R2 e R3 entre os anos de 2021 e 2022

| MESES         | UMIDADE (%) |       |       | SÓLIDOS VOLÁTEIS (%) |       |       |
|---------------|-------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|               | R1          | R2    | R3    | R1                   | R2    | R3    |
| <b>Jun/21</b> | 94,30       | 93,64 | 97,89 | 90,82                | 91,42 | 66,63 |
| <b>Jul/21</b> | 94,63       | 93,46 | 97,83 | 92,04                | 97,01 | 77,34 |
| <b>Ago/21</b> | 94,72       | 94,22 | 97,33 | 92,63                | 95,28 | 74,35 |
| <b>Set/21</b> | 94,89       | 94,28 | 96,86 | 93,60                | 95,33 | 78,52 |
| <b>Out/21</b> | 96,06       | 94,90 | 96,06 | 83,62                | 92,67 | 76,62 |
| <b>Nov/21</b> | 96,04       | 96,20 | 98,27 | 93,21                | 94,89 | 64,49 |
| <b>Dez/21</b> | 95,61       | 97,69 | 97,92 | 82,43                | 80,12 | 66,03 |

|               |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Jan/22</b> | 94,91 | 95,55 | 97,57 | 89,19 | 87,91 | 71,07 |
| <b>Fev/22</b> | 93,22 | 95,24 | 96,89 | 82,73 | 80,23 | 83,79 |
| <b>Mar/22</b> | 93,38 | 94,57 | 97,60 | 88,75 | 90,93 | 74,12 |

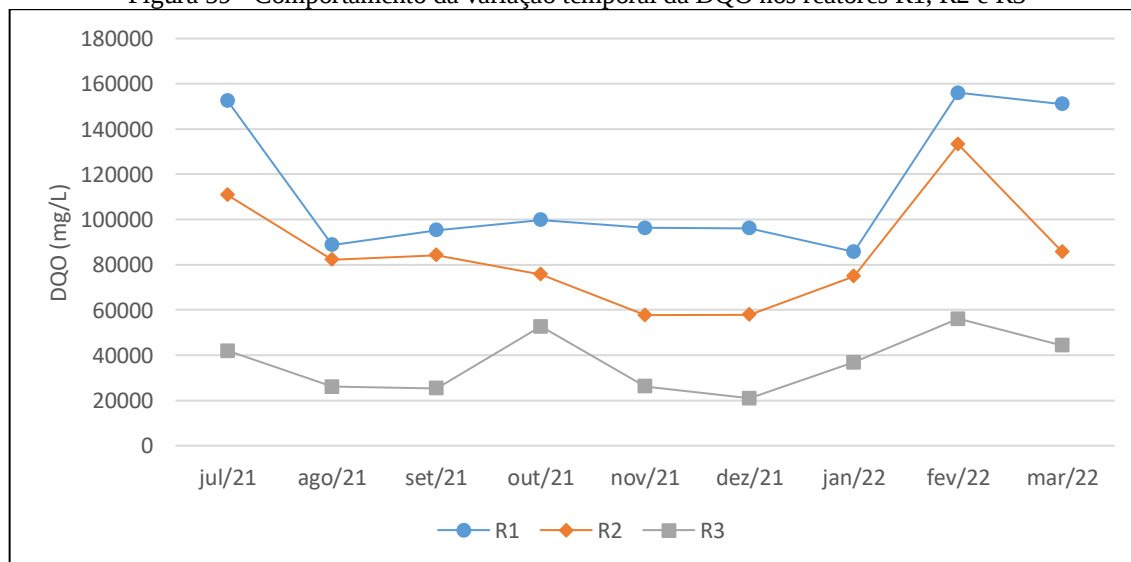
Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7.2.3 Comportamento da variação temporal da DQO no sistema de biodigestão anaeróbia

A geração de biogás é diretamente proporcional a remoção de DQO, sendo este um parâmetro de extrema importância quanto a biodegradabilidade (REIS, 2012). Conforme a Figura 59, observa-se a diminuição da DQO no decorrer do tempo, onde o valor máximo foi obtido para os reatores R1 e R2 nos meses de julho de 2021 (152.446,8 mg/L para o R1 e 110.879,4 para o R2) e fevereiro de 2022 (156.059,20 mg/L para o R1 e 133.213,62 mg/L para o R2), com posterior redução, o que indica um início da fase metanogênica, visto que a diminuição da DQO é um comportamento pertencente a essa fase.

No mês de fevereiro de 2022 houve um aumento no preenchimento da quantidade de resíduos ao sistema, o que pode ter interferido nesse aumento de DQO, visto que, segundo SÁNCHEZ *et al.*, 2001, o aumento da carga orgânica no sistema diminui a remoção de DQO e pode prejudicar a eficiência da digestão anaeróbia, diminuindo a produção de metano.

Figura 59 - Comportamento da variação temporal da DQO nos reatores R1, R2 e R3



Fonte: A Autora (2023).

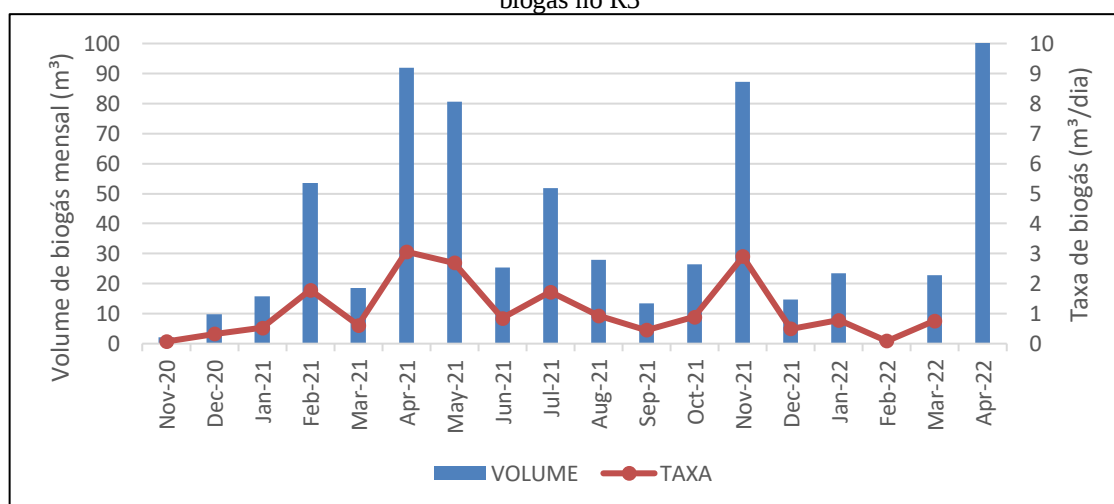
#### 4.7.2.4 Volume acumulado e Taxa de Geração de Biogás do sistema de biodigestão anaeróbia

Quanto aos resultados de volume mensal de biogás (Figura 60), observou-se que o mês de abril de 2021 apresentou o melhor desempenho da operação, com 91,88 m<sup>3</sup>/mês e taxa máxima de geração de biogás de 3,06 m<sup>3</sup>/dia. Neste mês, observou-se que 70% dos resíduos inseridos no biodigestor era composto por materiais de maior frequência de aparecimento na composição gravimétrica, ou seja, os resíduos de PIM+BER+TOM+LAR.

O menor resultado para volume acumulado foi identificado no mês de fevereiro de 2022, onde a redução atingiu 2,5 m<sup>3</sup>/mês e uma taxa de 0,08 m<sup>3</sup>/dia de biogás gerado no sistema. Este comportamento pode ter ocorrido em virtude dos testes de aumento de carga no digestor, que acarretou em uma redução no pH e na produção de geração de biogás. Quanto aos resultados de volume acumulado de biogás, entre os meses de novembro de 2021 e março de 2022, o volume acumulado no sistema apresentou 567,83 m<sup>3</sup> de biogás gerado no sistema.

Com base nos valores de carga total no reator e produção de gás foi possível estimar a geração de energia total do sistema no período de estudo. Desta forma, considerando que a planta possui um motor gerador de 8 kW, se o mesmo ficasse ligado integralmente a rede de energia, o mesmo teria trabalhado cerca de 141,95 horas, o que teria resultado numa geração de 1.135,66 kWh de energia elétrica durante o período em estudo.

Figura 60 - Comportamento da variação temporal do volume acumulado e da taxa de geração de biogás no R3

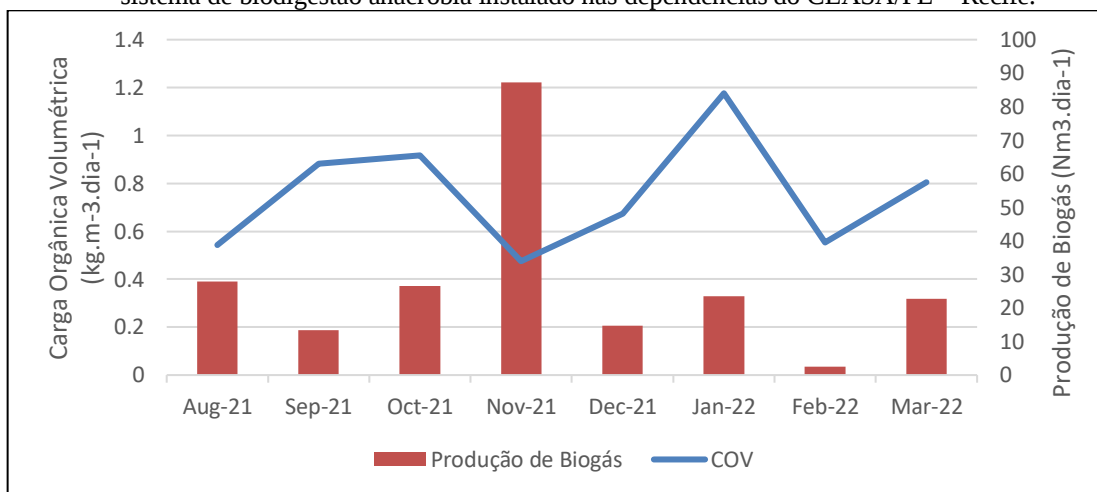


Fonte: A Autora (2023).

Os reatores de mistura completa são projetados para operar em altas taxas, sendo dimensionados para suportar uma elevada carga orgânica volumétrica (COV) em geral entre 1 e 5 kgSV.m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, a depender da configuração operacional de cada reator (CHERNICHARO,

2007). Malinowsky (2016) verificou que houve acidificação quando a carga foi máxima. Para tanto, no sistema de biodigestão instalado no CEASA/PE-Recife, a COV máxima diária foi de  $1,17 \text{ kgSV.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$  (Figura 61) ocorrida no mês de janeiro de 2022, quando observou-se a desestabilização do sistema.

Figura 61 - Comportamento da Carga Orgânica Volumétrica e da Produção mensal de Biogás no sistema de biodigestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE – Recife.



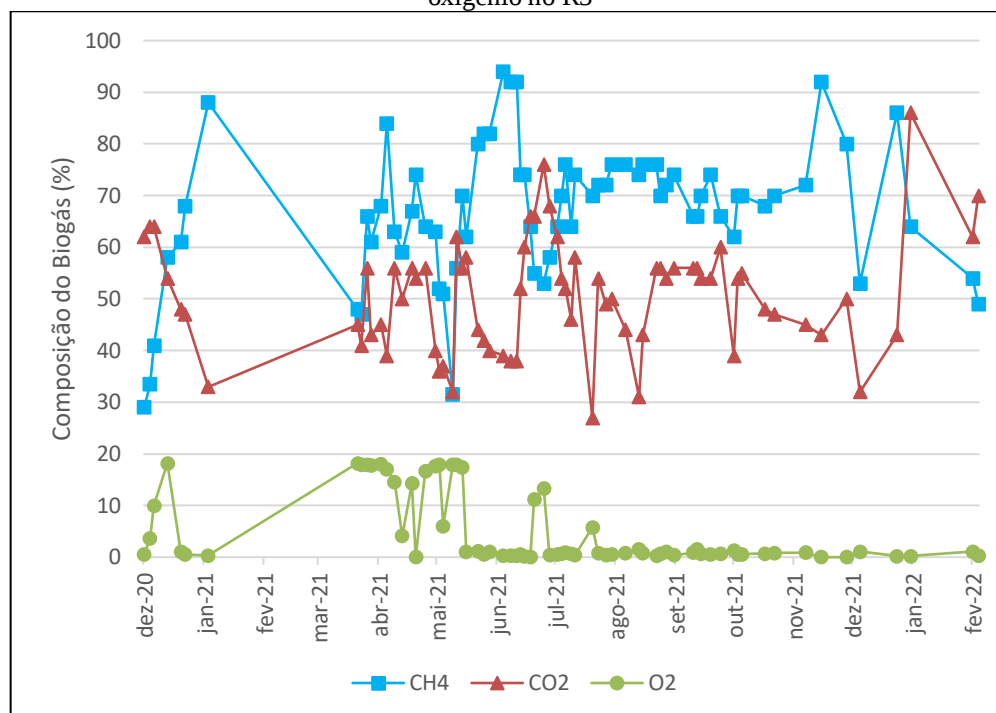
Fonte: A Autora (2023).

#### 4.7.2.5 Composição do Biogás conferido ao sistema de biodigestão anaeróbia

A Figura 62 apresenta o comportamento da composição do biogás obtido no sistema ao longo de 16 meses de operação. Em dezembro de 2020, o teor de metano era de 29%, no entanto, em junho e novembro de 2021, atingiram mais de 90% de CH<sub>4</sub>. Este comportamento apresentado inicialmente demonstra um período inicial de inibição, provavelmente provocado em virtude da carga inicial, demonstrando uma certa instabilidade ao processo de digestão anaeróbia.

Entre os meses de junho de 2021 e novembro de 2021, observou-se um decréscimo da geração de metano, com uma média de 70%, posteriormente, atingiu-se cerca de 90% em dezembro de 2021, onde a COV era de  $0,67 \text{ kgSV.m}^{-3}.\text{dia}^{-1}$ . Em janeiro de 2022, no momento do início do aumento de carga, observou-se uma queda brusca neste percentual, atingindo 49% em fevereiro de 2022.

Figura 62 - Comportamentos das variações temporais das porcentagens de gás metano, dióxido de carbono e oxigênio no R3



Fonte: A Autora (2023).

A Figura 63 apresenta o comportamento do preenchimento, pH e composição de biogás nas diferentes fases do processo, desde o início do experimento até o momento onde ocorreu um aumento da carga no sistema de biodigestão anaeróbia. Para tanto, é possível identificar que, na Fase I, referente a partida do reator e visando à aclimatização dos micro-organismos, uma oscilação no pH foi identificada, chegando a atingir 4,87, constatando a acidificação do sistema. Consequentemente observa-se uma menor produção de metano. Esta condição é comumente identificada visto a adaptação do inóculo a uma fonte rica em carbono.

Após 33 dias, inicia-se a Fase II, na qual foram realizados aportes com rúmen bovino, chegando a atingir uma produção de metano de 90%, além de obter como resposta a faixa de pH adequada, variando entre 6,2 e 7,6.

Apesar da obtenção a valores adequados para a operação, a Fase III iniciou-se após 78 dias de operação, sendo observada uma leve diminuição no pH e nos valores de volume, taxas de geração de biogás e metano. Shahriari *et al.* (2012), trabalhando com resíduos alimentares, relatam que a recirculação com o lixiviado pode inibir a atividade metanogênica. Neste sentido, o aporte de lixiviado para auxiliar na trituração dos resíduos pode ter influenciado neste comportamento.

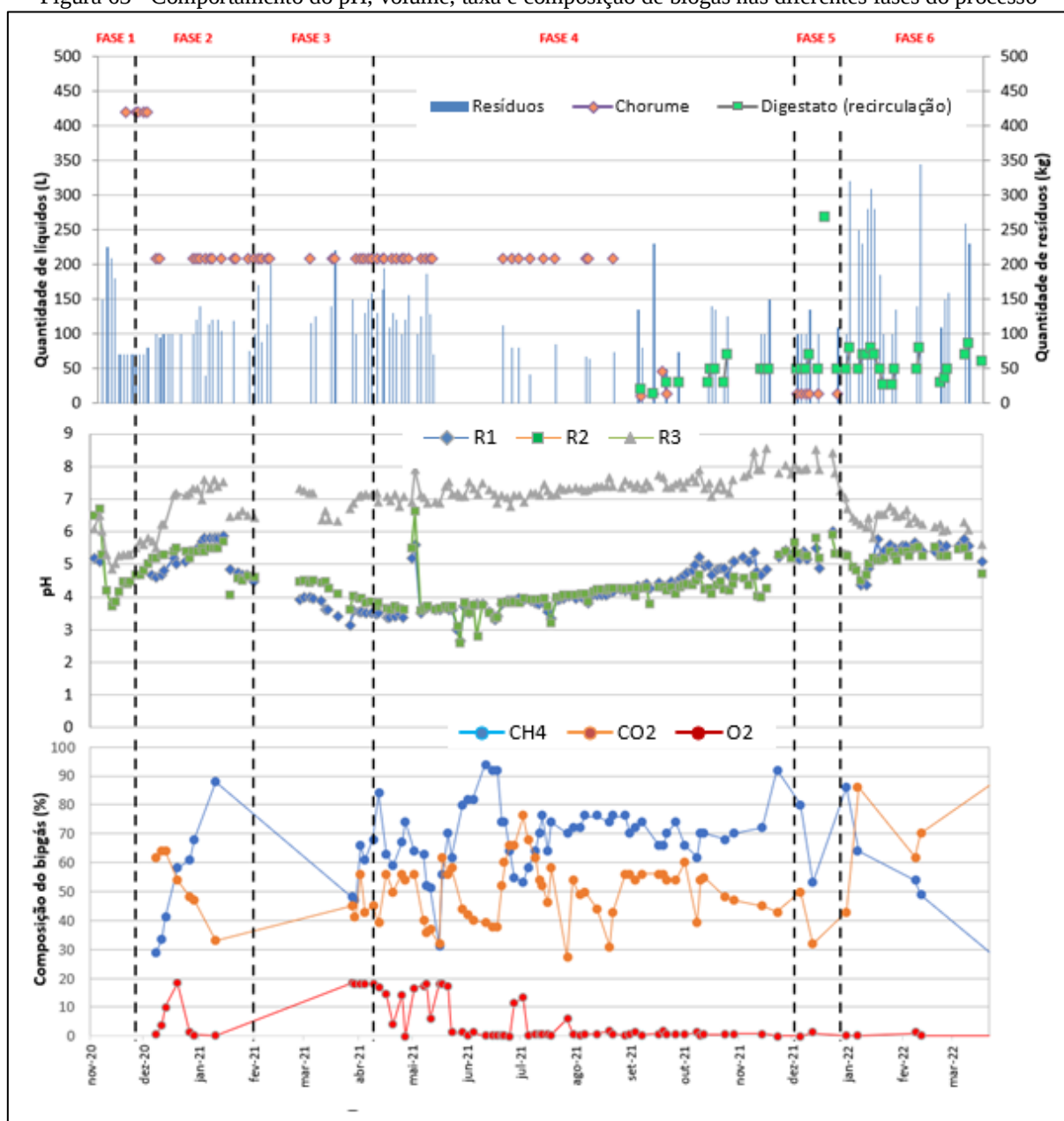
Após correção do sistema, na Fase IV os parâmetros foram controlados atingindo um estado de equilíbrio por cerca de 245 dias. Nesta fase, houve a diminuição do auxílio da

trituração com o lixiviado pela recirculação do efluente gerado no sistema de digestão anaeróbia. Para tanto, o sistema apresentou variações de 6,8 à 8,4 para o pH, 31,5% a 90% de  $\text{CH}_4$ .

Na Fase 5, foi realizado o controle do pH, que retomou aos valores indicados pela literatura, como também um aumento do percentual de  $\text{CH}_4$ .

Por fim, na Fase VI, procedeu-se com o aumento da carga no sistema de biodigestão anaeróbia. No entanto, esta ação se revelou como um obstáculo para o sistema, afetando a estabilidade do reator.

Figura 63 - Comportamento do pH, volume, taxa e composição de biogás nas diferentes fases do processo



Fonte: A Autora (2023).

#### 4.8 BALANÇO DE MASSA

Visando a verificação da eficiência do processo na conversão do substrato em biogás em sistemas de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos, são comumente realizados o balanço de massa. A Tabela 20 apresenta os valores médios em termos de concentração da série de sólidos e de DQO entre os meses de agosto/2021 e março/2022.

Tabela 20 - Valores médios do sistema de biodigestão anaeróbia instalado no CEASA/PE - Recife em termos de concentração da série de sólidos, DQO e eficiência na remoção entre os anos de 2021 e 2022

| EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DOS SÓLIDOS |           |           |           |           |           |           |            |            |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
|                                   | Agosto    | Setembro  | Outubro   | Novembro  | Dezembro  | Janeiro   | Fevereiro  | Março      |
| ST afluente                       | 69.758,00 | 91.473,33 | 35.940,00 | 83.426,67 | 33.726,67 | 51.980,00 | 67.766,67  | 53.110,67  |
| ST efluente                       | 14.606,67 | 19.024,00 | 33.993,33 | 8.860,00  | 11.400,00 | 8.060,00  | 10.020,00  | 7.813,33   |
| ST removidos                      | 55.151,33 | 72.449,33 | 1.946,67  | 74.566,67 | 22.326,67 | 43.920,00 | 57.746,67  | 45.297,33  |
| % remoção                         | 79,06     | 79,20     | 5,42      | 89,38     | 66,20     | 84,49     | 85,21      | 85,29      |
| STV afluente                      | 64.614,00 | 85.620,00 | 30.053,33 | 77.760,00 | 27.800,00 | 46.360,00 | 56.060,00  | 47.133,33  |
| STV efluente                      | 8.639,33  | 12.081,33 | 28.626,67 | 3.320,00  | 4.000,00  | 2.146,67  | 3.473,33   | 2.466,67   |
| STV removidos                     | 55.974,67 | 73.538,67 | 1.426,67  | 74.440,00 | 23.800,00 | 44.213,33 | 52.586,67  | 44.666,67  |
| % remoção                         | 86,63     | 85,89     | 4,75      | 95,73     | 85,61     | 95,37     | 93,80      | 94,77      |
| Relação STV/ST afluente           | 0,93      | 0,94      | 0,84      | 0,93      | 0,82      | 0,89      | 0,83       | 0,89       |
| STF afluente                      | 5.144,00  | 5.853,33  | 5.886,67  | 5.666,67  | 5.926,67  | 5.620,00  | 11.706,67  | 5.977,33   |
| STF efluente                      | 5.967,33  | 6.942,67  | 5.366,67  | 5.540,00  | 7.400,00  | 5.913,33  | 6.546,67   | 5.346,67   |
| EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE DQO      |           |           |           |           |           |           |            |            |
| DQO afluente                      | 88.759,60 | 95.357,60 | 99.811,25 | 96.347,30 | 96.182,35 | 85.708,02 | 156.059,20 | 151.110,70 |
| DQO efluente                      | 11.714,75 | 4.176,53  | 7.828,53  | 3.102,71  | 8.661,52  | 1.700,63  | 5.873,87   | 7.820,28   |
| DQO removida                      | 77.044,85 | 91.181,06 | 91.982,72 | 93.244,59 | 87.520,82 | 84.007,39 | 150.185,33 | 143.290,42 |
| Remoção de DQO (%)                | 86,80     | 95,62     | 92,16     | 96,78     | 90,99     | 98,02     | 96,24      | 94,82      |

Fonte: A Autora (2023).

Com base nos resultados, foi possível realizar o balanço de massa no que concerne ao tratamento anaeróbio processado no interior de um reator do tipo RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) considerando a massa do afluente, a massa do efluente e a massa convertida em biogás, tendo em vista que a  $\Delta M_{ac} = 0$ . A Tabela 21 apresenta a massa de DQO obtida.

Tabela 21 - Massa de DQO obtida entre os anos de 2021 e 2022 no sistema de biodigestão anaeróbia instalada no CEASA/PE-Recife

| <b>Parâmetros/Meses</b> | <b>Massa DQO<br/>afluente (g)</b> | <b>Massa DQO<br/>efluente (g)</b> | <b>Massa de<br/>Biogás (g)</b> | <b>DQO total<br/>removida<br/>convertida em<br/>Biogás (%)</b> |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Agosto</b>           | 54.232,11                         | 7.157,71                          | 47.074,40                      | 86,80                                                          |
| <b>Setembro</b>         | 79.528,23                         | 3.483,23                          | 76.045,00                      | 95,62                                                          |
| <b>Outubro</b>          | 65.276,55                         | 5.119,86                          | 60.156,70                      | 92,16                                                          |
| <b>Novembro</b>         | 73.320,29                         | 2.361,16                          | 70.959,13                      | 96,78                                                          |
| <b>Dezembro</b>         | 110.609,70                        | 9.960,75                          | 100.648,94                     | 90,99                                                          |
| <b>Janeiro</b>          | 227.126,25                        | 4.506,68                          | 222.619,57                     | 98,02                                                          |
| <b>Fevereiro</b>        | 163.862,15                        | 6.167,56                          | 157.694,59                     | 96,24                                                          |
| <b>Março</b>            | 228.177,15                        | 11.808,62                         | 216.368,53                     | 94,82                                                          |

Fonte: A Autora (2023).

A partir dos resultados obtidos observa-se uma conversão de biogás entre 86,80 e 98,02%. Cavinato *et al.* (2011) ao avaliar a produção de metano em escala industrial observaram uma eficiência de remoção em torno de 87%, com geração de metano em torno de 52%. Já Colussi *et al.* (2013), ao avaliar a eficiência de remoção em um sistema de digestão no tratamento de silagem de milho obtiveram uma remoção de cerca de 85%. Assim, o melhor desempenho de conversão do substrato em biogás foi observado em janeiro de 2022. Nesta fase a trituração era realizada com recirculação do digestato proveniente do reator R3.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este tópico apresenta as conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

### 6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se assim concluir que:

- Em termos do mapeamento dos resíduos, a análise inicial foi realizada em campo, onde se observou uma maior concentração de resíduos de frutas e verduras nos galpões LP1, LP2, LP3 e PRONAF, visto possuírem um maior potencial de comercialização.
- No que concerne aos dados referentes à caracterização gravimétrica, observou-se que em termos de resíduos de frutas e verduras, destaca-se a quantidade de materiais do tipo folhosos/hortaliças.
- Na avaliação da frequência de aparecimento, observou-se que os resíduos de pimentão, beringela, laranja, tomate e folhosos apareceram nos 12 meses de ensaios de composição gravimétrica.
- As características físico-químicas comprovaram o alto percentual de umidade e sólidos voláteis dos resíduos de pimentão, laranja, tomate, beringela e folhosos, indicando que esses são materiais rapidamente degradáveis e favoráveis a digestão anaeróbia.
- A caracterização da fibra do substrato indicou um elevado percentual de lignina para os resíduos de pimentão, com 33,50%, que pode atuar como um limitante na produção de biogás;
- A partir da caracterização química dos resíduos e considerando uma similaridade de 68,0, através da análise de Cluster, observou-se uma proximidade para os resíduos de Pimentão e Tomate. Para a taxa de geração, apenas a configuração TOM+RB não apresentou agrupamento com nenhuma outra configuração.
- Em termos de potencial de geração de biogás, os ensaios de BMP comprovaram que as configurações com o inóculo LE apresentaram os maiores resultados, onde a configuração TOM+LE destacou-se com potencial de geração de 84,43NmL/gS e 97,18NmL/gSV. Já a laranja obteve um maior potencial na configuração LAR+RB,

com 68,79NmL/gS e 72,05NmL/gSV. Já a configuração de FLS+LE+RB apresentou um potencial de geração de biogás de 22,36NmL/gS e 17,04NmL/gSV, sendo esses os menores resultados obtidos no ensaio.

- Para todas as combinações de substrato e inóculos em ensaios de BMP, observou-se que a taxa máxima de geração de biogás ocorreu nas primeiras 24 horas após a incubação, seguindo uma tendência a estabilização e tendendo a 0 após o 35º dia, sendo essa a duração necessária para a degradação completa de substratos orgânicos.
- A avaliação do comportamento do pH no início e no final do experimento comprovou que a quantidade de NaOH e CaCO<sub>3</sub> foi suficiente para não permitir a acidificação ao experimento, porém, as configurações que continham a laranja, ou seja, LAR+LE, LAR+RB e LAR+LE+RB apresentaram redução de pH, após 133 dias de ensaio. Considerando que em 7 dias a taxa de geração de biogás deste tipo de resíduo já tinha atingido cerca de 80%, constatou-se que, não houve declínio do pH, obtendo um resultado ao final dos 7 dias de 7,10, 7,23 e 7,40 para cada configuração respectivamente.

No que concerne ao preenchimento do Sistema de Biodigestão Anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE - Recife, a viabilidade técnica do mesmo foi identificada e considerada como positiva a implantação e as condições do sistema, com algumas conclusões específicas:

- Constatou-se uma grande quantidade de resíduos de laranja, pimentão e tomate, comprovando a composição gravimétrica inicial quanto a frequência de aparecimento dos mesmos.
- Os resultados de pH indicaram sobre a importância quanto ao aporte com rúmen bovino ao reator R3, sendo verificada a reação ao meio e a retomada ao pH ideal do sistema, conferindo um pH médio variando entre 7,01 e 8,00.
- Quanto aos resultados de volume mensal de biogás, observou-se que o mês de abril de 2021 apresentou o melhor desempenho da operação, com 91,88 m<sup>3</sup>/mês e taxa máxima de geração de biogás de 3,06m<sup>3</sup>/dia. Neste mês, observou-se que 70% dos resíduos inseridos no biodigestor era composto por materiais de maior frequência de aparecimento na composição gravimétrica, ou seja, os resíduos de PIM+BER+TOM+LAR.

- Em termos de volume acumulado, o sistema apresentou 567,83 m<sup>3</sup> de biogás gerado no sistema, onde considerando a carga total e a potência de 8kW do motor, constatou-se que no período em estudo haveria uma geração de energia elétrica de 1.135,66 kWh.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Realizar estudos do potencial de geração e biogás em escala de laboratório dos demais resíduos de frutas e verduras disponíveis no CEASA/PE - Recife, utilizando diferentes proporções de inóculos, permitindo assim um maior entendimento sobre a codigestão desses componentes, utilizando as recomendações da norma VDI 4630 e DIN para a realização dos ensaios de BMP.

Realizar teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) para verificar a qualidade do inóculo e a capacidade de os micro-organismos converterem os substratos orgânicos em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.

Realizar estudos de modelagem assumindo a ocorrência de estágios múltiplos quando na codigestão dos resíduos com dois inóculos diferentes com um tempo de incubação dos ensaios de escala de laboratório maior que 100 dias.

Realizar estudos para quantificar a possível quantidade carbono reduzido pela codigestão de resíduos de frutas e verduras com diferentes inóculos no sistema de biodigestão anaeróbia;

Caracterizar e avaliar o biofertilizante sólido e líquido gerado após tratamento no sistema de digestão anaeróbia instalado nas dependências do CEASA/PE - Recife, considerando os parâmetros exigidos pela legislação e sua aplicação para a agricultura.

Analisar a viabilidade da utilização do metano produzido no sistema de biodigestão anaeróbia do CEASA/PE - Recife para a geração de energia elétrica.

Realizar estudos sobre a viabilidade econômica da construção de um digestor anaeróbio em escala real com base nos dados resultantes da pesquisa no CEASA/PE – Recife.

## REFERÊNCIAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457**. Amostras de solo: Preparação de ensaio de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro. 1986.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
3. ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2020.
4. ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**. V. 3. 299-307. 2017.
5. ADEKUNLE, K. F., OKOLIE, J. A. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, 6, 205-212, 2015.
6. ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição dos resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007.
7. AL SEADI, T.; LUKEHURST, C. Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser. **IEA Bioenergy**. Task 37. Energy from Biogás. 2012.
8. ALVES, I.R.F.S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 117p. 2008.
9. ALVES, I. R. F. S. **Avaliação da codigestão na produção de biogás**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.
10. ANDRADE, M. M. M. **Parâmetros operacionais da digestão anaeróbia de resíduos de alimentos para fins energéticos**. 93f. Tese (Doutorado). Recife. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 93p. 2018
11. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília: ANEEL, 2002.
12. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. ed. 2, 243p. Brasília. 2005.
13. ANEEL- Agência Nacional de Energia (2022). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/> acessado em junho de 2022.
14. ANP – Agência Nacional do Petróleo. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017**. Brasília. 2017.

15. ANGELIDAKI, L.; AHRING, B. K. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. **Water Science Technology**, v. 41, n. 3, p. 95- 189, 2000.
16. ANGELIDAKI, I, ALVES, M., BOLZONELLA, D, BORZACCONI, L, CAMPOS, J. L, GUWY, A. J, KALYUZHNYI, S, JENICEK, P, VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v.59, n.5, p.927-934. 2009.
17. AOOUN, W.B.; GABRIELLE, B.; GAGNEPAIN, B. The importance of land use change in the environmental balance of biofuels. **Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 20, n. 5, p. 1-12, 2013.
18. APPELS, L.; LAUWERS, L.; DEGRÈVE, J.; HELSEN, L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; VAN IMPE, J.; DEWIL, R. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 4295-4301, 2011.
19. AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas estratégicas de controle. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro. v. 10. n. 1. P. 151-161, 2005.
20. ARAGAW, T., MEBEASELASSIE, A. AND AMARE, G. (2013) Co-digestion of cattle manure with organic kitchen waste to increase biogas production using rumen fluid as inoculums. **International Journal of the Physical Science**. Vol. 8(11), pp. 443-450.
21. ARELLI, V., MAMINDLAPELLI, N.K., BEGUM, S., JUNTUPALLY, S., ANUPOJU, G.R. Solid state anaerobic digestion of food waste and sewage sludge: impact of mixing ratios and temperature on microbial diversity, reactor stability and methane yield. **Sci. Total Environ**. 793, 148586. 2021.
22. BAJPAI, P. Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry. **Springer Briefs in Applied Sciences and Technology**. 2017.
23. BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília. 2009.
24. BARLAZ, M. A. A landfill carbono balance: gas production and control, and carbono sequestration. **Dakofa Waste and Climate Conference. Copenhagen**, Dinamarca. 2009.
25. BATIDZIRAI, B., SMEETS, E. M. W., FAAIJ, A. P. C. Harmonising bioenergy resource potentials – methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 6598–630p. 2012.

26. BIOPROCESS CONTROL. **Automatic Methane Potential Test System – Operation and Maintenance Manual**. Bioprocess Control, Sweden AB. 2014.
27. BORTOLOTTI, M.A., CHALLIOL, A.Z., NAVARRO, B.L., SICCHIERI, I. M.; KURODA, · E. K.; FERNANDES, F. Challenges of Load Variation on Anaerobic Digestion of Organic Waste on a Full Scale: An Applied Study. **Waste Biomass Valor**, 2023.
28. BOTHEJU, D., BAKKE, R. Oxygen Effects in Anaerobic Digestion – A Review. The Open **Waste Management Journal**, 4, 1-19, 2011.
29. BOUALLAGUI, H.; HAOUARI, O.; TOUHAMI, Y.; CHEIKH, R.; MAROUANI, L.; HAMDI, M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 2143-2148, 2004.
30. BOUALLAGUI, H.; LAHDHEB, H.; BEM ROMDAN, E.; RACHDI, B.; HAMDI, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. **Journal of environmental management**. v, 90, n, 5, p, 1844-1849, 2009.
31. BRAGUGLIA CM, GALLIPOLI A, GIANICO A, PAGLIACCIA P. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. **Bioresource Technology**, vol. 248, 37-56. 2018
32. BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**.
33. BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás** / Probiogás. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Autores: Elisa Thieme [et al.]. – Brasília, DF Ministério das Cidades, 190p. 2015.
34. BRITO, E. P. L. **Avaliação da biodegradação e geração de biogás de resíduos envelhecidos sob condições de reatores experimentais**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2015.
35. CABBAI V, BALLICO M, ANEGGI E, GOI D. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. **Waste management**. v. 33, n. 7, p. 1626–32, jul. 2013.
36. CALDAS, A. S. **Geração de metano devido à digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos - estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador – BA**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia. Salvador-BA. 154p. 2011.
37. CÂMARA, F. M. DA, GOMES, C. DE B., MATUK, T. T., SZARFARC, S. C. Caracterização dos resíduos gerados na Ceasa paulistana sob a ótica da saúde ambiental e segurança alimentar. **Segurança Alimentar e Nutricional**, 395-403. (2014).

38. Campuzano, R., González-Martínez, S. (2015). Extraction of soluble substances from organic solid municipal waste to increase methane production. **Bioresource Technology**, 178, 247–253. doi:10.1016/j.biortech.2014.08.042
39. CARITAS, N. T. **Digestion Anaerobia en Comunidades Rurales. Proyecto Fin de Carrera**. Area de Ingenieria Térmica Y de Fluidos. Universidade Carlos III de Madrir. Escuela Politecnica Superior. 2008.
40. CASSINI, S. T. *et al.* Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos. In: CASSINI, S. T. (Org.). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Projeto PROSAB. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003.
41. CAVINATO, C.; BOLZONELLA, D.; FATONE, F.; CECCHI, F.; PAVAN, P. (2011) Optimization of two-phase thermophilic anaerobic digestion of biowaste for hydrogen and methane production through reject water recirculation. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 18, p. 8605-8611.
42. CEASA/PE. **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos**, 2017.
43. CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores Anaeróbios**, v. 5. 2 ed. Belo Horizonte: Segrac, DESA, UFMG, 246 p, 1997.
44. CHERNICHARO, C. A. L., **Reatores anaeróbios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 246p. 2007.
45. CHRISTY, P. M., GOPINATH, L. R., DIVYA, D. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 34, 167–173, 2014.
46. CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. **Conceitos básicos e digestão anaeróbia**. Curso de Fundamentos do Biogás: Produção e uso energético do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018.
47. CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. **Características e aplicações do biogás e do digestato**. Curso de Fundamentos do Biogás: Produção e uso energético do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018.
48. CIBIOGÁS– Centro Internacional de Energias Renováveis. **Unidade de Demonstração de Itaipu**. Relatório 2018. Foz do Iguaçu, 2018.
49. CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. **Biogás: Panorama do Biogás no Brasil 2021**. Relatório Técnico nº 001/2022. Foz do Iguaçu, 2022.
50. COLUSSI, I.; CORTESI, A.; GALLO, V.; RUBESA FERNANDEZ, A.S.; VITANZA, R. (2013) Improvement of methane yield from maize silage by a two-stage anaerobic process. **Chemical Engineering Transactions**, v. 32, p. 151-156.

51. CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Centrais de Abastecimento: **Comercialização total de frutas e hortaliças** / Companhia Nacional de Abastecimento. – v.1. Brasília, 2022.
52. CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Informativo da Classificação Anual de Comercialização por Quantidades da Ceasa no Período: 2021/2022.** Brasília, 2023. Disponível em: [http://www3.ceasa.gov.br/siscomweb/?page=reports.relatorio\\_classificacao\\_hortigranjeiro\\_ranking&retTO=consulta\\_relatorio\\_classificacao\\_hortigranjeiro\\_ranking](http://www3.ceasa.gov.br/siscomweb/?page=reports.relatorio_classificacao_hortigranjeiro_ranking&retTO=consulta_relatorio_classificacao_hortigranjeiro_ranking). Acesso em: 08.01.2023.
53. COSSU, R; PIVATO, A; RAFA, R. The mass balance: a supporting tool for a sustainable landfill managment. **International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills**. Grenoble. France. 2005.
54. COSTA, R. J. R. **Produção e aplicação de biogás**. Dissertação de Mestrado em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia. Instituto Politécnico de Coimbra. Coimbra. 2011.
55. DA SILVA C.; ASTALS S.; PECES M.; CAMPOS JL.; GUERRERO L. Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. **Waste Management**, v. 71, p. 19–24. 2018.
56. DE LIMA, A. L; JUCÁ, J. F. T; BRITO, A. R; MELO, M. C. Estudos comparativos de diferentes metodologias para determinação de umidade e sólidos voláteis aplicadas em resíduos sólidos urbanos. In: **Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 6., Anais. Vitória. Espírito Santo. 2002.
57. DE SANTOLI, L., PAIOLO, R., & LO BASSO, G. An overview on safety issues related to hydrogen and methane blend applications in domestic and industrial use. **Energy Procedia**, 126, 297–304. (2017).
58. DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. **WILEY VCH**. Alemanha. 2008.
59. DI MARIA, F.; BARRATTA, M.; BIANCONI, F.; PLACIDI, P.; PASSERI, D. Solid anaerobic digestion batch with liquid digestate recirculation and wet anaerobic digestion of organic waste: Comparison of system performances and identification of microbial guilds. **Waste Management**, v. 59, 172–180, 2017.
60. DINCĂ, M.; VOICU, G.; FERDES, M.; PARASCHIV, G.; MOICEANU, G.; UNGUREANU, N.; IONESCU, M. The substrate influence on the anaerobic digestion process. **4 th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development**, 2015.
61. DOELLE, H. W. Biomass and Organic Waste Conversion to Food, Feed, Fuel, Fertilizer, Energy and Commodity Products. Biotechnology X. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)**. 2013.

62. DONOSO-BRAVO, A.; PÉREZ-ELVIRA, S. I.; FDZ-POLANCO, F. Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 160, n. 2, p. 607-614, 2010.
63. DUAN, N.; DONG, B.; WU, B.; DAI, X. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 150–156, 2012.
64. EDWIGES, T. **Biodigestão anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2017.
65. EDWIGES, T; FRARE, L; MAYER, B; LINS, L; TRIOLO, J. M; FLOTATS, X; COSTA, M. S. S. M. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v.71, 618–625. 2018.
66. EBA, European Biogás Association. EBA Statistical Report 2018 - **European Overview**. 2018.
67. ERSAHIN, M.E., OZGUN, H., DERELI, R.K., OZTURK, I. Anaerobic treatment of industrial effluents: An overview of applications. **In: Einschlag, F.S.G. (Ed.), Waste Water-Treatment and Reutilization**. InTech, India, pp. 3–28. 2011.
68. EUROBSERV'ER. **Biogas barometer**. Disponível em: <https://www.eurobserv-er.org/online-database/>. 2020.
69. FAGERSTRÖM, A., AL SEADI, T., RASI, S., BRISEID, T, (2018). The role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy. Murphy, J.D. (Ed.) **IEA Bioenergy Task 37**, 2018: 8.
70. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture - Statistical Yearbook**. 2021.
71. FERNÁNDEZ J, PÉREZ M, ROMERO LI. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). **Bioresource Technology**. Sep 30;99(14):6075-6080. 2008.
72. FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2015.
73. FERREIRA, B. O. **Estratégias operacionais para o incremento da metanização em estado sólido de resíduos orgânicos urbanos com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2019.
74. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR). **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010.

75. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR). **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Gülzow, Alemanha, 2013.
76. FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013.
77. FRANCOU, C. **Stabilisation de matière organique au cours du compostage de déchets urbains: influence de la nature des déchets et du procédé de compostagem - Recherche d'indicateurs pertinents**. 2003. 290 f. Tese (Docteur de l'institut national agronomique paris-grignon). Institut National Agronomique. Paris – Grignon, 2003.
78. FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNATI, M. **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015.
79. GANESH, R., TORRIJOS, M., SOUSBIE, P., LUGARDON, A., STEYER, J. P., DELGENES, J. P. Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: comparison of start-up, reactor stability and process performance. **Waste Management**, 34, 875–885. 2014.
80. GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
81. GHALEB, A.A.S.; KUTTY, S.R.M.; HO, Y-C.; JAGABA, A.H.; NOOR, A.; AL-SABAEI, A.M.; ALMAHBASHI, N.M.Y. Response surface methodology to optimize methane production from mesophilic anaerobic co-digestion of oily-biological sludge and sugarcane bagasse. **Sustainability**, 12. 2020.
82. GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O.; SCHIRMER, W. N.; BURATTO, W. G.; RIBEIRO, C. B.; BESINELLA, G. B. Digestão Anaeróbia de Resíduos Alimentares Utilizando Ensaio BMP. **BIOFIX Scientific Journal**. V. 3(1):8-16. 2018.
83. GUNASEELAN, V. N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, [s.l], v. 26, p. 389-399, 2004.
84. GRIMBERG, S.; HILDERBRANDT, D.; KINNUNEN, M.; ROGERS, S. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester - Assessment of variable loadings on system performance. **Bioresource Technology**. 178, 226–229. 2015.
85. HAGOS, K., ZONG, J., LI, D., LIU, C., LU, X. Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 76, 1485–1496. 2017.

86. HANSEN T.L., SCHMIDT J.E., ANGELIDAKI I., MARCA E., JANSEN J.C., MOSBAEK H., CHRISTENSEN, T. H. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. **Waste Management**, v. 24, p.393-400. 2004.
87. HOLANDA, S. H. B. **Uso de consórcio microbiano facultativo no estudo da biodegradação e geração de biogás de resíduos sólidos urbanos envelhecidos em aterros**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2016.
88. HOLLIGER, C.; ALVES, M.; ANDRADE, D.; ANGELIDAKI, I.; ASTALS, S.; BAIER, U.; BOUGRIER, C.; BUFFIÈRE, P.; CARBALLA, M.; DE WILDE, V.; *et al.* Towards a Standardization of Biomethane Potential Tests. **Water Sci. Technol.** 2016, 74, 2515–2522.
89. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Solid Waste Disposal – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Report produced for invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change** (2006).
90. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Desperdício - Custo para todos - Alimentos apodrecem enquanto milhões de pessoas passam fome. **Revista do IPEA**, v. 6, n. 54, 2009.
91. ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu prova ser viável a replicação de planta de biogás para todo o país**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-prova-ser-viavel-replicacao-de-planta-de-biogas-para-todo-o-pais>> Acesso em: 19 de março de 2019.
92. IVANOVA, L.K., RICHARDS, D.J., SMALLMAN, D.J. The long-term settlement of landfill waste. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Waste and Resource Management**. v.161, n.3, p. 121-133, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1680/warm.2008.161.3.121>
93. IZHAR, T. N. T., ZAKARYA, I. A., ZAABA, S. K., YUSOF, A. H. M, SHAHRIL, N. M. A review of food waste characterization and treatment in anaerobic digestion. **International Conference on Civil and Environmental Engineering**, 2021.
94. JABEEN, M.; YOUSAF, S.; HAIDER M. R.; MALIK, R. N. High-solids anaerobic codigestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [s.l], v. 102, p. 149–153, 2015.
95. JACINTO, S. A. **Sustentabilidade urbana: Análise de viabilidade da implementação de um digestor anaeróbio de Resíduos Orgânicos na freguesia dos Olivais**, Lisboa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Técnico de Lisboa. Lisboa. 2014.
96. JAHANBAKHSHI A, RASOOLI SHARABIANI V, HEIDARBEIGI K, KAVEH M, TAGHINEZHAD E. Evaluation of engineering properties for waste control of tomato during harvesting and postharvesting. **Food Sci Nutr**. 2019 Mar 10;7(4):1473-1481. <https://doi:10.1002/fsn3.986>

97. JI, C., KONG, C.-X., MEI, Z.-L., LI, J. A review of the anaerobic digestion of fruit and vegetable waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 183(3), 906–922. 2017.
98. JIANG, J.; ZHANG, Y.; LI, K.; WANG, Q.; GONG, C.; LI, M. Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. **Bioresource technology**, v, 143, p, 525-530, 2013.
99. JUCÁ, J.F.T.; MACIEL, F. J.; MARIANO, M.O.H.; BRITO, A. R. **Relatório Técnico do estudo de Aproveitamento Energético do Biogás no Aterro da Muribeca**. Universidade Federal de Pernambuco/ Grupo de Resíduos Sólidos, Recife – PE. 2005.
100. JUCÁ, J.F.T.; LIMA, J.D.; MARIANO, M.O.H.; FIRMO, A.L.; LUCENA, L.F.L.; ANDRADE LIMA, D.G. **Análise das Diversas Tecnologias e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Projeto desenvolvido pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Convênio FADE/BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2013).
101. JUCÁ, J.F.T.; SILVA, R. C. P; HOLANDA, S. H. B *et al.* **Estudo simplificado da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares no aterro sanitário CTR Candeias**. Projeto desenvolvido pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife. (2020).
102. KADER, F., BAKY, M.D., ABDULLAH H., NAZMUL, M., CHOWDHURY, H. Production of Biogas by Anaerobic Digestion of Food Waste and Process Simulation. **American Journal of Mechanical Engineering**. Vol 3. 79-83. (2015).
103. KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management & Research**, v. 31, p. 1737–1744, 2011.
104. KIM, J.K.; OH, B.R.; CHUN, Y.N.; KIM, S.W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste, **Journal of Bioscience and Bioengineering**, vol. 102, n. 4, 328–332, 2006.
105. KIRAN, E. U; TRZCINSKI, A.; JERN, NG; LIU, Y. (2014). Bioconversion of food waste to energy: A review. **Fuel**. 134. 389–399.
106. KIYASUDEEN S, K., IBRAHIM, M. H., QUAIK, S., ISMAIL, S. A. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes. **Prospects of Organic Waste Management and the Significance of Earthworms**, 23-44. 2016.
107. KINNUNEN M, HILDERBRANDT D, GRIMBERG S, ROGERS S, MONDAL S. Comparative study of methanogens in one- and two-stage anaerobic digester treating food waste. **Renewable Agriculture and Food Systems**. 2014;30(6):515-523.

108. KOTHARI, R., PANDEY, A.K., KUMAR, S., TYAGI, V.V., TYAGI, S.K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bioenergy: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 39, 174–195, 2014.
109. KUO, J.; DOW, J. Biogas production from anaerobic digestion of food waste and relevant air quality implications. *J. Air. Waste. Manag.* 2017, 67, 1000–1011.
110. KUNZ, A, STEINMETZ, R. L.R, AMARAL, A.C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 209 p. 2019.
111. KUPPER, T., BRÄNDLI, R.C., BUCHELI, T.D., STÄMPFLI, C., ZENNEGG, M., BERGER, U., MÜLLER, J. Organic pollutants in compost and digestate: Occurrence, fate and impacts. *Proceedings: International Conference*. (2006).
112. KUPPER, T.; BÜRGE, D.; BACHMANN, H.; GÜSEWELL, S.; MAYER, J. Heavy metals in source-separated compost and digestates. **Waste Management**. 34. 10.1016/j.wasman.2014.02.007. 2014.
113. LAY, J.-J., LI, Y.-Y., NOIKE, T. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. **Water Research**, 31(6), 1518–1524. (1997).
114. LEITE, V.D.; POVINELLI, J.; VASQUEZ, V. R. C. **Emprego do balanço de massa na avaliação do processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos**. 1997, Anais. Foz do Iguaçu: ABES, 1997.
115. LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T., PRASAD, S., SILVA, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Engenharia Agrícola**, v.13, n.2, p.190-196, 2009.
116. LI, L., KONG, X., YANG, F., LI, D., YUAN, Z., SUN, Y. Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass. **Appl. Biochem. Biotechnol.** 166, 1183–1191. 2012.
117. LIMA, F. P. **Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 139p. 2005.
118. LISSENS, G., VANDEVIVERE, P., DE BAERE, L., BIEY, E.M., VERSTRAE, W. Solid waste digesters: process performance and practice for municipal solid waste digestion. **Water Sci. Technol.** 44, 91–102. 2001.
119. LIU, G.; LIU, X.; LI, Y.; HE, Y.; ZHANG, R. Influence of pH adjustment and inoculum on anaerobic digestion of kitchen waste for biogas producing, **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, V. 5, 390–395. 2011.
120. LIU, X.; GAO, X.; WANG, W.; ZHENG, L.; ZHOU, Y.; SUN, Y. Pilot-scale anaerobic codigestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. **Renewable Energy**, [s.l], v. 44, p. 463-468, 2012.

121. LIU GUANGQING, LIU XIAOYING, LI YEQING, HE YANFENG, Z. RUIHONG. Influence of pH adjustment and inoculum on anaerobic digestion of kitchen waste for biogas producing, J. **Biobased Mater Bioenergy**, 3 (2015), pp. 390-395.
122. LONG , H., LI, X., WANG , H., JIA, J. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 26, 344–352. (2013).
123. LU, J.; XU, S. Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review. **Journal of Cleaner Production**, 303, 127033. (2021).
124. LUCENA, T. V. **Avaliação da geração de biogás sob Diferentes condições de biodegradação de Resíduos alimentares**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2016.
125. MAGALHÃES, G. V.V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaio de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.
126. MAHMUDUL, H.M.; RASUL, M.G.; AKBAR, D.; NARAYANAN, R.; MOFIJUR., M. A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system. **Science of the Total Environment** 753, 141920. (2021).
127. MALINOWSKY, C. **Avaliação da digestão anaeróbia em duas fases de resíduos alimentares em escala piloto**. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2021.
128. MAO C, FENG Y, WANG X, REN G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renew and Sustainable Energy Reviews**, 45, 540–55. 2015.
129. MARIANI, L. **Biogás: Diagnósticos e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 144p. 2018.
130. MARIANO, M. O. H; MACIEL, F. J. M; FUCALE, S. P; JUCÁ, J. F. T; BRITO, A. R. Estudo da Composição dos RSU do projeto piloto para recuperação do biogás no Aterro da Muribeca/PE. **VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO’2007**. Recife – PE.
131. MARTÍN, M. A.; SILES, J. A.; CHICA, A.F.; MARTÍN, A. Biomethanization of orange peel waste. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, p. 8993–8999, 2010.
132. MARTÍNEZ, M.; DRILLER, L.; CHAMY, R.; SCHUCH, W.; NOGUEIRA, M.; FRASER P. Biogas potential of residues generated by the tomato processing industry under different substrate and inoculum conditions. **4th World Congress on Anaerobic Digestion**. Viña del Mar. Chile. 2015.

133. MARTÍNEZ, M., DRILLER, L., CHAMY, R., SCHUCH, W., NOGUEIRA, M. AND FRASER, P. (2017). Biogas potential of residues generated by the tomato processing industry under different substrate and inoculum conditions. **Acta Hortic.** 1159, 151-158.
134. MASEBINU, S.O., AKINLABI, E.T., MUZENDA, E., ABOYADE, A.O., MBOHWA, C. Experimental and feasibility assessment of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. **Waste Management**, v.75, páginas 236–250. 2018.
135. MEEGODA, J.N.; LI, B.; PATEL, K.; WANG, L.B. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 2018.
136. MELO, E. S. R. L. **Análise de biodegradabilidade dos materiais que compõem os resíduos sólidos urbanos através de ensaios BMP (Biochemical Methane Potential)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010.
137. MILANEZ, A. Y; GUIMARÃES, D. D; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. Biogás de Resíduos Agroindustriais: Panorama e Perspectivas. Biogás. **BNDES Setorial** 47, p. 221-276.2018.
138. MONNET, F. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. **In Remade Scotland**; Final Report Biogasmx, 2003.
139. MONFET, E.; AUBRY, G.; RAMIREZ, A. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. **Biofuels** 9 (2), 247e262. 2018.
140. MORAIS, N. W. S. **Recuperação de subprodutos (metano e ácidos carboxílicos) em sistemas anaeróbios tratando resíduos agroindustriais**. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE. 168p. 2019.
141. MORALES-POLO, C.; CLEDERA-CASTRO, M.D.M.; MORATILLA SORIA, B.Y. Biogas Production from Vegetable and Fruit Markets Waste—Compositional and Batch Characterizations. **Sustainability** 2019, 11, 6790.
142. MOTTA, E. Q. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. Tese de Doutorado. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 190p. 2011.
143. MSHANDETE, A.; BJÖRNSSON, L.; KIVAIISI, A.; RUBINDAMAYUGI, M.S.T. & MATTIASSON, BO. (2006). Effect of Particle Size on Biogas Yield from Sisal Fibre Waste. **Renewable Energy**. 31. 2385-2392. 10.1016/j.renene.2005.10.015.

144. NALO, T., TASING, K., KUMAR, S., BHARTI, A. Anaerobic digestion of municipal solid waste: A critical analysis. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(4), 224-234. (2013).
145. NARTKER, S., AMMERMAN, M., AURANDT J., STOGSDIL, M., HAYDEN, O., ANTLE, C. Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry. *Bioresource Technology* v. 34, p. 2567–2571, 2014.
146. OLIVEIRA, L. R. G. D. **Estudo para a metanização de resíduos alimentares**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2018.
147. ORRICO JÚNIOR, M. A. P, ORRICO, A. C. A., LUCAS JÚNIOR, J. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.31, n.2, p.399-410, 2011.
148. OSIDACZ, R. C. AND AMBRÓSIO-UGRI, M. C. B. (2013) Physicochemical quality of eggplant dehydrated with varied pretreatments. *Acta Scientiarum. Technology*, 35(1), pp. 175-179.
149. OSORIO, F; TORRES, J. C. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, v. 34, 2009.
150. PAPARGYROPOULOU, E.; LOZANO, R.; STEINBERGER, J.K.; WRIGHT, N.; UJANG, Z.B. The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste. *J. Clean. Prod.* 2014, 76, 106–115.
151. PAUDEL, S. R., BANJARA, S. P., CHOI, O. K., PARK, K. Y., KIME, Y. M., LEE, J. W. Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. *Bioresource Technology* 245, 1194–1205, 2017.
152. PAVI, S., KRAMER, L. E., GOMES, L. P., MIRANDA, L. A. S. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*, V. 228, páginas 362–367. 2017.
153. PELLERA, F.-M.; GIDARAKOS, E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, n. 3, p. 3217-3229, 2016.
154. PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F. Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura. *Revista Ambiente & Água*, v. 4, p. 157-168, 2009.
155. PEREIRA, A. S; MEMEDOVIC, J; PHILIPS, C. Cenário regulatório do biometano na União Européia. Workshop Projeto 27 – As perspectivas de contribuição do biometano para aumenta a oferta de Gás Natural em São Paulo. **Research Centre for Gas Innovation**. São Paulo. 2016.

156. PERES, S. Shopping Camará com energia limpa. **Diário de Pernambuco**. 2016. Disponível em: <http://www.impresso.diariodepernambuco.com.br/noticia/cadernos/economia/2016/06/shopping-camara-com-energia-limpa.html>. Acesso em: 10.12.2021.
157. PHAM, C. H.; TRIOLO, J. M.; CU, T. T. T.; PEDERSEN, L.; SOMMER, S. G. Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure. **Asian-Australasian Journal of Animal Science**, v. 26, p. 864-873, 2013.
158. PILARSKA, A.A.; KULUPA, T.; KUBIAK, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; PILARSKI, K.; NIEWIADOMSKA, A. Anaerobic Digestion of Food Waste—A Short Review. **Energies**, 16, 5742. 2023.
159. PRAMANIK S.K., SUJA F.B., PORHEMMAT M., PRAMANIK B.K. Performance and kinetic model of a single-stage anaerobic digestion system operated at different successive operating stages for the treatment of food waste. 7, 600. **Processes**. 2019.
160. PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Coordenador: Cassini, S. T. Rio de Janeiro. 2003.
161. QUEIROZ, T. A. N. As Ceasas no contexto da reestruturação do território brasileiro. **Revista Geotemas**, v. 8, p. 59-78, 2018.
162. PROTEGEER. Capacitação sobre a Nota Técnica Conjunta MP/MCIDADES/FUNASA nº 164/2018-MP - **Diretrizes para a estruturação de projetos relacionados ao manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no âmbito do FEP**. Apresentação. 2018.
163. RABII, A.; ALDIN, S.; DAHMAN, Y.; ELBESHBISHY, E. A review on anaerobic co-digestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration. **Energies**, vol. 12. 2019.
164. RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: Na onverview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 861-877, 2012.
165. RINALDI, M.; SANDRI, D.; RIBEIRO, M.; AMARAL, A. Características físico-químicas e nutricionais de pimentão produzido em campo e hidroponia. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 28. 2008.
166. RINCÓN, B; BUJALANCE, F.G. FERMOSE, A. MARTÍN, R. BORJA. Biochemical methane potential of two-phase olive mill solid waste: influence of thermal pretreatment on the process kinetics. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 249-255, 2013.

167. REGO, E.E.; HERNÁNDEZ, F.M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar. Contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. **An. 6. Enc. Energ. Meio Rural**. 2006.
168. REICHERT, G.A. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campo Grande – MS. 2005.
169. REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. 2012.
170. RESPLANDES, H.M.S. JORGE, L.N. SANTOS, L.M. FERREIRA, M.M.B. **Caracterização Física dos Resíduos Sólidos da Centrais de Abastecimento de Goiás S/A – Ceasa – GO**. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, 2004.
171. RYCKEBOSCH, E., DROUILLON, M., VERVAEREN H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and bioenergy**, v.35, páginas 1633-1645. 2011.
172. SÁNCHEZ, E; BORJA, R; WEILAND, P; TRAVIESO, L; MARTIN, A. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. **Process Biochemistry**. v. 37. p. 483–489. 2001.
173. SANTANA, D. S. **O método simplex para planejamento de substrato-inóculo para otimização da produção de biometano a partir dos resíduos de frutas e verduras**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2023.
174. SANTOS, M. C. A; SILVA, T. Avaliação do mercado de frutas e hortaliças embaladas, minimamente processadas, orgânicas e desidratadas na capital de Minas Gerais. 113 p.: il. **Estudo técnico realizado pela CEASAMINAS – Unidade Grande BH**, 2010.
175. SANTOS, T. N. **Biodigestão anaeróbia de palma forrageira, vinhaça e resíduos alimentares para produção de biogás**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2017.
176. SANTOS, L.A; SANTOS, A. F. M. S; VALENÇA, R. B., JUCA, J. F. T; OLIVEIRA, C. R. M. Produção de biogás a partir de bagaço de laranja. **Revista Geama**, Recife, v.4, n.3, p.022-027, 2018.
177. SANTOS FILHO, D. A. **Estudo da influência de inóculos e configurações de reatores no processo digestão anaeróbia de resíduo sólido orgânico**. Tese (Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. 2018.
178. SANTOS, L. A. **Potencial de geração de biogás a partir de resíduos agroindustriais de frutas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2019.

179. SCANO, E.A., ASQUER, C., PISTIS, A., ORTU, L., DEMONTIS, V., COCCO, D. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. **Energy Conversion and Management**. v. 77, p. 22–30, 2014.
180. SEABRA JÚNIOR, E. **Análise da produção de biogás proveniente da mistura de biomassa da suinocultura com bagaço de cana em diferentes granulometrias**. Dissertação de Mestrado - UNIOESTE. Cascavel, PR. 2017.
181. SEBOLA, M; TESFAGIORGIS, H; MUZENDA, E. Effect of particle size on anaerobic digestion of different feedstocks. **South African Journal of Chemical Engineering**, vol. 20, no. 3, pp. 11- 26, 2015.
182. SESWOYA, R., FEN, A. S, YANG, L. K., SULAIMAN, S. M. Performance of Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste (FVW). **International Symposium on Green and Sustainable Technology**, 2019
183. SHAHRIARI H, WARITH M, HAMODA M, KENNEDY KJ. Effect of leachate recirculation on mesophilic anaerobic digestion of food waste. **Waste Management**. V. 32, p. 400–403. 2012.
184. SHI, X.-S.; DONG, J.-J.; YU, J.-H.; YIN, H.; HU, S.-M.; HUANG, S.-X.; YUAN, X.-Z. Effect of hydraulic retention time on anaerobic digestion of wheat straw in the semicontinuous continuous stirred-tank reactors. **BioMed Research International**. 2017.
185. SHRESTHA, N., FOGG, A., WILDER, J., FRANCO, D., KOMISAR, S., GADHAMSHETTY, V. Electricity generation from defective tomates. **Bioelectrochemistry** 112, 67–76. 2016.
186. SILVA, G. A. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2017.
187. SILVA-BELTRÁN NP, RUIZ-CRUZ S, CIRA-CHÁVEZ LA, ESTRADA-ALVARADO MI, ORNELAS-PAZ JDJ, LÓPEZ-MATA MA. Total Phenolic, Flavonoid, Tomatine, and Tomatidine Contents and Antioxidant and Antimicrobial Activities of Extracts of Tomato Plant. **Int J Anal Química**. 2015;2015.
188. SINGH, N.B., KUMAR, A., RAI, S. Potential production of bioenergy from biomass in an Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 65-78p. 2014.
189. SLOPIECKA, K.; LIBERTI, F.; MASSOLI, S.; BARTOCCI, P.; FANTOZZI, F. Chemical and physical characterization of food waste to improve its use in anaerobic digestion plants. **Energy Nexus**, vol 5. 2022.
190. SOARES, A. G.; FREIRE JR, M. **Perdas de frutas e hortaliças relacionadas às etapas de colheita, transporte e armazenamento. Desperdício de alimentos:**

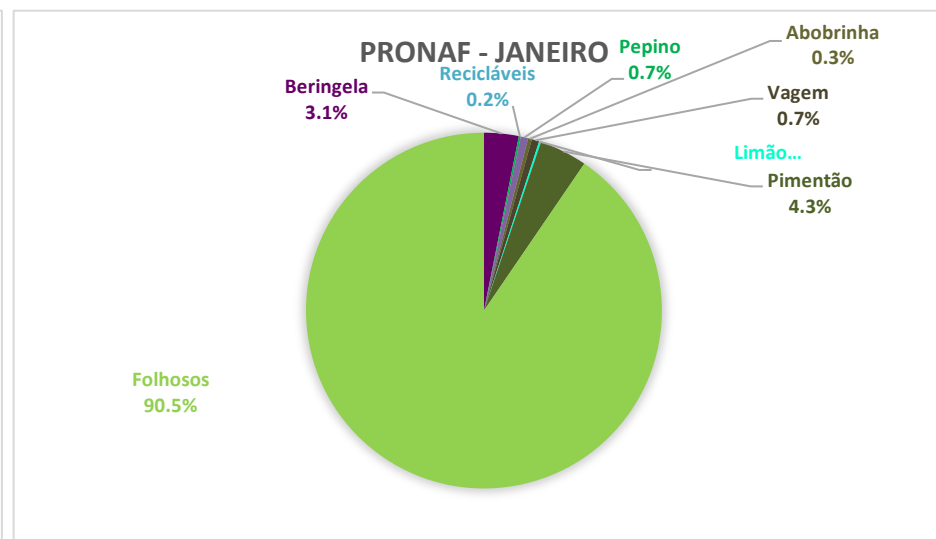
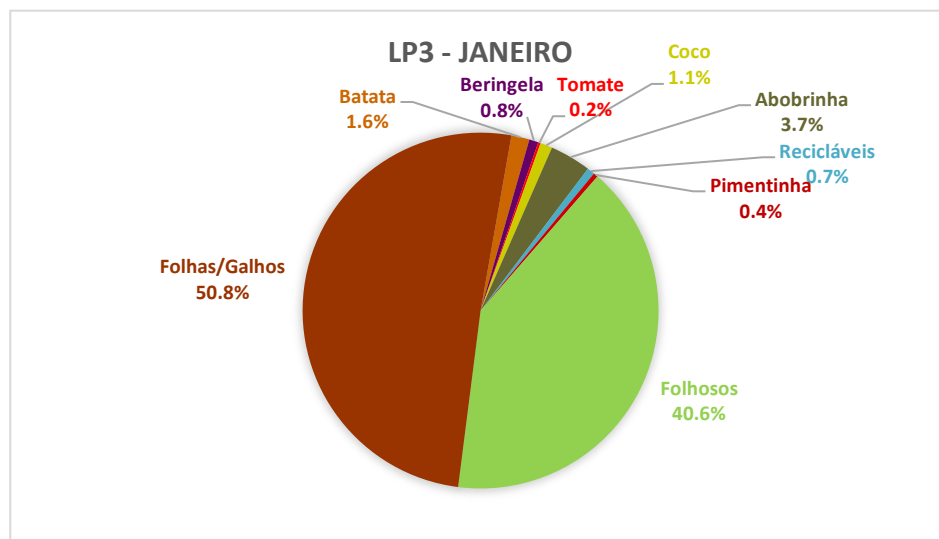
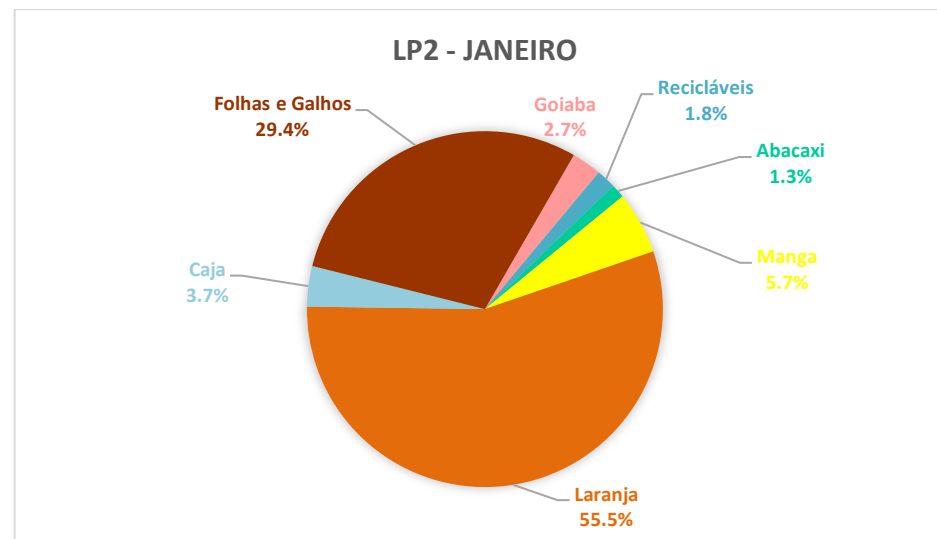
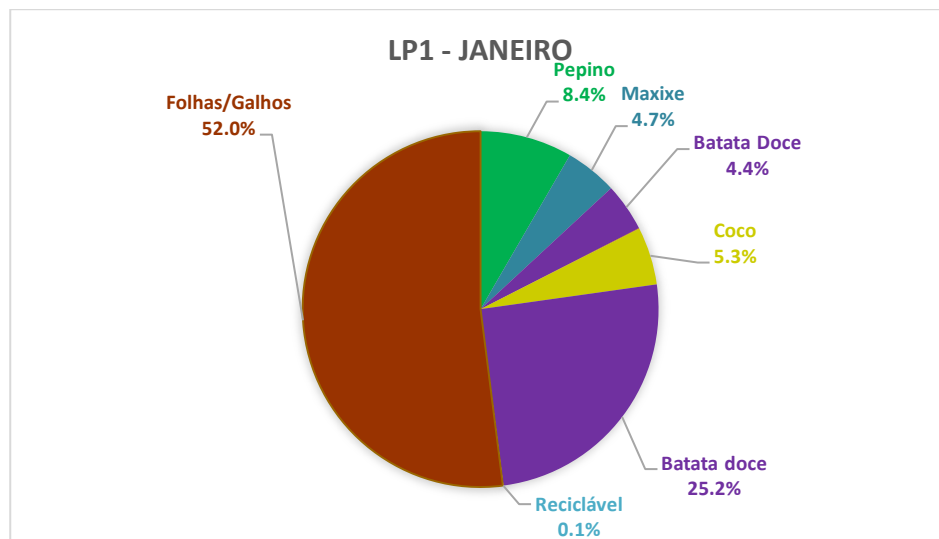
- velhos hábitos, novos desafios** / org. Marcelo Zaro. – Caxias do Sul, RS: Educs, 2018.
191. SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, 1984.
  192. SOUZA, A.; PERES, S. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização do Biogás Produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto do Recife como Combustível para Veículos Leves. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**. V. 4. 1-9. 2019.
  193. SRISOWMEYA, G.; CHAKRAVARTHY, M.; NANDHINI DEVI, G. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, 2020.
  194. STORCK, C. R., LORENZONI NUNES, G., BORDIN DE OLIVEIRA, B., BASSO, C. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 537-543, Mar. 2013.
  195. STOLECKA, K., RUSIN, A. Potential hazards posed by biogas plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 135, 2021.
  196. SWEWW-2540. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Analysis of total solids and solids volatiles**. 2010
  197. SZILÁGYI Á, BODOR A, TOLVAI N, KOVÁCS KL, BODAI L, WIRTH R, BAGI Z, SZEPESI Á, MARKÓ V, KAKUK B, BOUNEDJOUM N, RÁKHELY G. A comparative analysis of biogas production from tomato bio-waste in mesophilic batch and continuous anaerobic digestion systems. **PLoS One**. 2021 Mar 17;16(3):e0248654. doi: 10.1371/journal.pone.0248654. PMID: 33730081; PMCID: PMC7968646.
  198. H. Thakur, A. Dhar, S. Powar, Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in continuously stirred tank reactor, **Res. Eng.** 16 (2022), 100617, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100617>.
  199. TCHOBANOGLIOUS, G; THEISEN, H; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. McGraw-Hill. 1993.
  200. TAHERZADEH, M.J.; KARIMI, K. Pre-treatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, [s.l], v. 9, p. 1621-1651, 2008.
  201. TIAN, H.; DUAN, N.; LIN, C.; LI, X.; ZHANG, M. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 120, n. 1, p. 51–7, jul. 2015.

202. TRIOLO J.M, PEDERSEN L, QU H, SOMMER S.G. Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. **Bioresour Technol.** 2012. Dec;125:226-32.
203. VALENÇA, R. B. **Avaliação da geração de biometano em diferentes cenários de biodegradação de resíduos alimentares.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2017.
204. VALENÇA, R.; SANTOS, L. A.; FIRMO, A.; SILVA, L.; LUCENA, T.; SANTOS, A.; JUCÁ, J. F. Influence of sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) on the methane generation potential of organic food waste. **Journal of Cleaner Production.** 2021.
205. VAN, D.P., FUJIWARA, T., LEU THO, B., TOAN, S. P. P., MINH, G.H. A Review of Anaerobic Digestion Systems for Biodegradable Waste: **Configurations, Operating Parameters, and Current Trends.** vol. 25 pp. 1–17. 2019.
206. VAN HAANDEL, A. C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente.** Paraíba. 1994.
207. VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant.** 2.ed. Ithaca: Cornell University Press/Constock Publish, 1994. 476p.
208. VARNERO M., M. T. (2011). **Manual de Biogás. Ministerio de Energía. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Global Environment Facility. Santiago de Chile.
209. VEIGA JÚNIOR, W. G. da; ROSA, E. de P; SILVA, T. Estrutura técnica de uma Central de Abastecimento. Associação brasileira das centrais de abastecimento - abracen. **Manual Operacional das Ceasas do Brasil.** Belo Horizonte: AD2 Editora, 2011. Disponível em: < <http://abracen.org.br/wpcontent/uploads/2014/05/manual.pdf> >. Acesso em: 30 out. 2018.
210. VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.** 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Terrestres) - Fundação Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas da Universidade de Columbia, Columbia. 2002.
211. Wang, Y. S.; Byrd, C. S.; Barlaz, M. A. Anaerobic biodegradability of cellulose and hemicelluloses in excavated refuse samples using a biochemical methane potential assay. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 13, p. 147-153, 1994.
212. WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, Essex, v. 99, p. 7928–7940, 2008.
213. WELFE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, 105, 83 – 95. (2017).

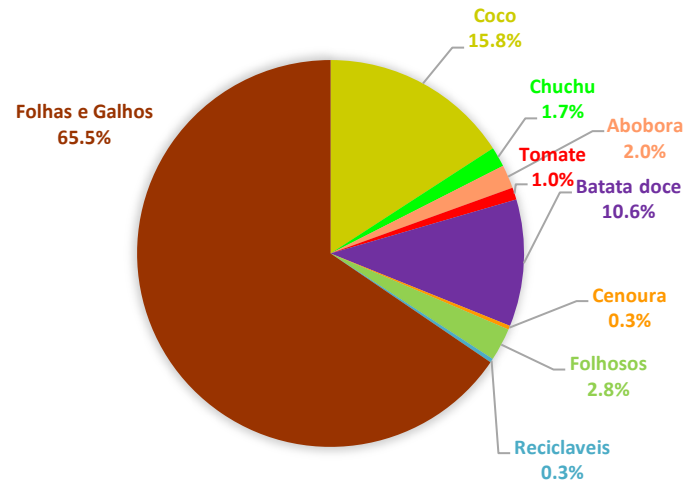
214. WBA- **World Biogas Association**. Global Potential of Biogas, 2019.
215. WBA- **World Bioenergy Association**. Global Bioenergy Estatistics, 2021.
216. WELLINGER, A; LINDBERG, A. Biogas Upgrading and Utilisation. **IEA Bioenergy Task**. Vol. 4. 2000.
217. WHO - International Reference Center for Waste Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. Suíça. 1978.
218. WWF (2012). **Além de grandes hidrelétricas – políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil**. Disponível em [http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem\\_de\\_grandes\\_hidreletricas\\_sumario\\_para\\_tomadores\\_de\\_decisao.pdf](http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf) acessado em fevereiro de 2019.
219. XU, F.; LI, Y.; GE, X.; YANG, L.; LI, Y. Anaerobic digestion of food waste – challenges and opportunities. **Bioresource Technology**. 247, 1047–1058. 2018.
220. XU N, LIU S, XIN F, ZHOU J, JIA H, XU J, JIANG M, DONG W. Biomethane Production From Lignocellulose: Biomass Recalcitrance and Its Impacts on Anaerobic Digestion. **Front Bioeng Biotechnol**. 2019.
221. Yadvika, S.; Sreeckrishnan, T. R.; Kohli, S.; Rana, V. Ehnhancemente of biogas production from solid substrates using different tecniques - a review. **BioresourceTecnology**, v. 95, p. 1-10, 2004.
222. YAZDANI, R. **Landfill-based anaerobic digester-compost pilot Project at Yolo Conty Central Landfill**. California Natural Resources Agency. Department of Resources Recycling and Recovery. State of California. 2010.
223. ZAMRI, M., HASMADY, S., AKHIAR, A., IDERIS, F., SHAMSUDDIN, A., MOFIJUR, M., FATTAH, I., MAHLIA, T. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 137, 2021.
224. ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., HARTMAN, K., WANG, F., LIU, G., CHOATE, C., GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, 98, 929–935, 2007.
225. ZHANG, J., LOH, K.-C., LEE, J., WANG, C.-H., DAI, Y., WAH TONG, Y. Three-stage anaerobic co-digestion of food waste and horse manure. **Scientific Reports**. 7: 1269. 2017.
226. ZHAO, C., Y, HU., LIU, Y., HUANG, Y., ZHANG, R., CHEN, C., LIU, X. Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. **Waste Management**. 52. 10.1016/j.wasman.2016.03.028. (2016).
227. ZHOU, Y.; ZHANG, Z.; NAKAMOTO, T.; LI, Y.; YANG, Y.; MOTOO, U. SUGIURA, N. Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic

digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions. **Biomass and Bioenergy**, Barcelona, v. 35, p. 3251–3256, 2011.

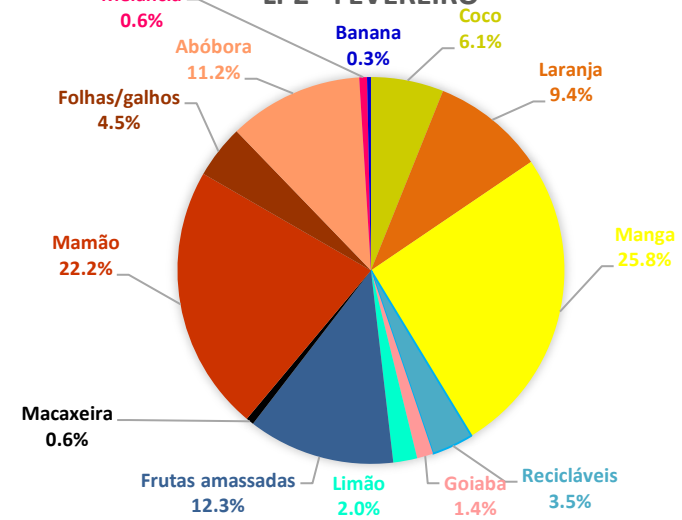
**APÊNDICE A – RESULTADOS MENSAIS DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS NOS GALPÕES LP1, LP2, LP3  
E PRONAF ENTRE OS ANOS DE 2020 E 2021**



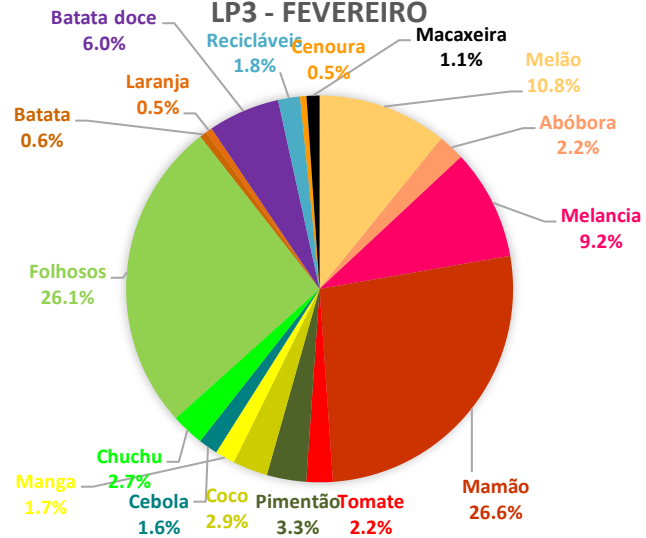
LP1 - FEVEREIRO



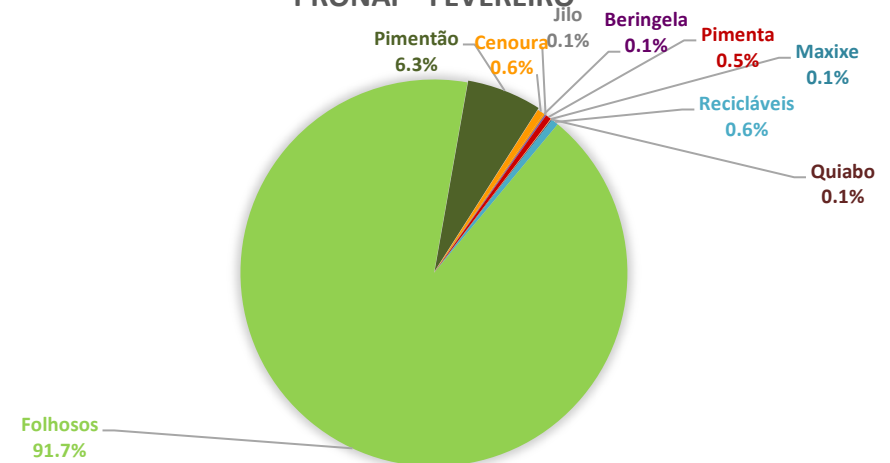
LP2 - FEVEREIRO

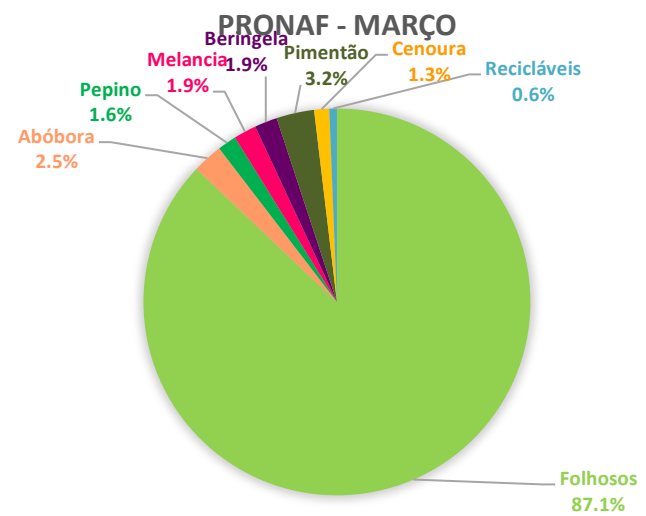
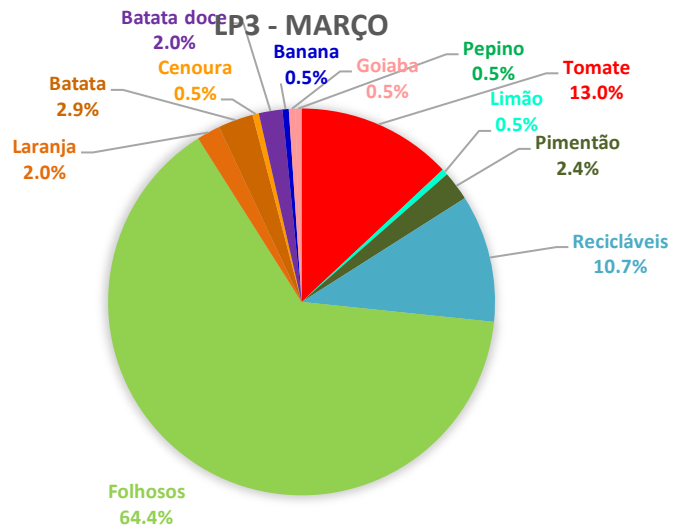
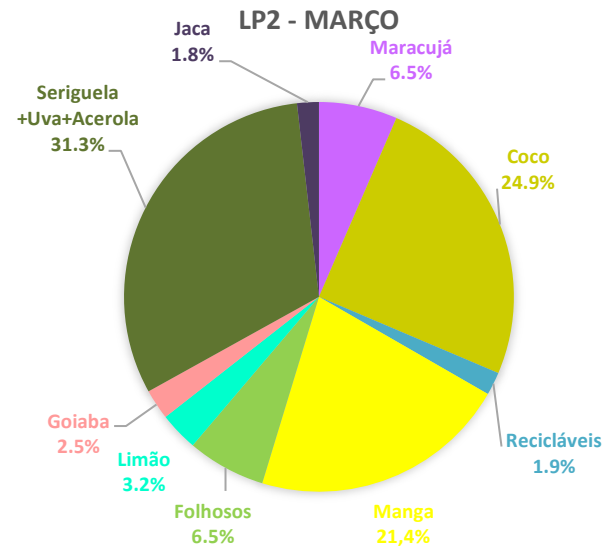
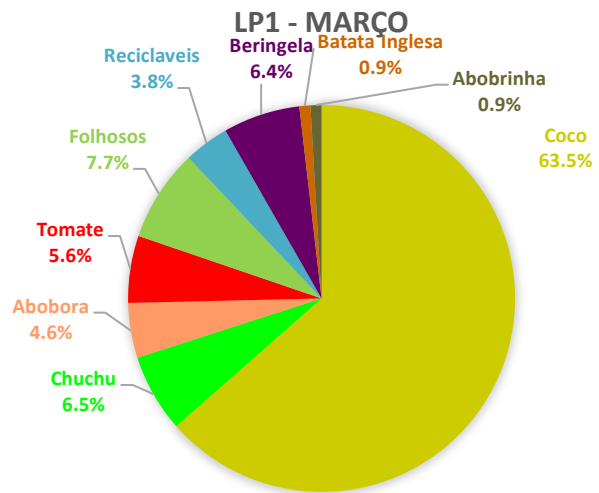


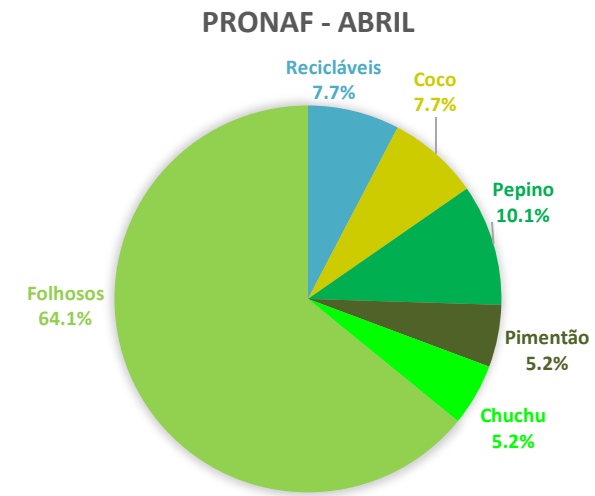
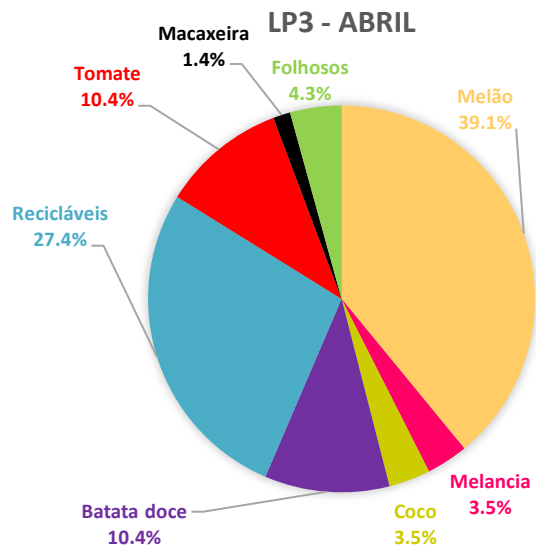
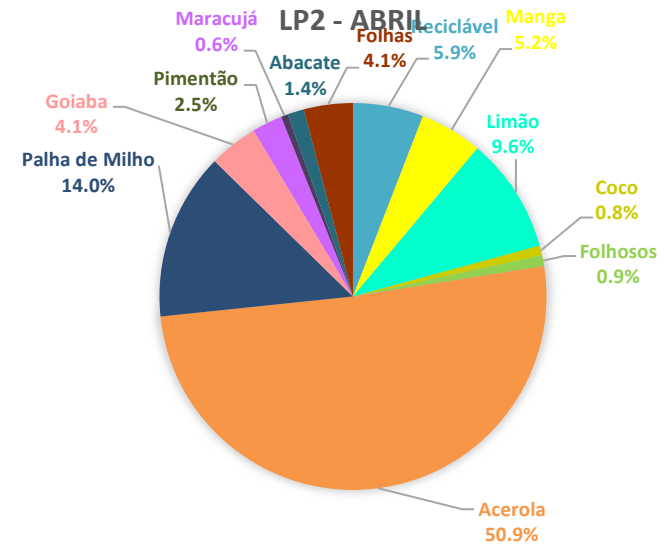
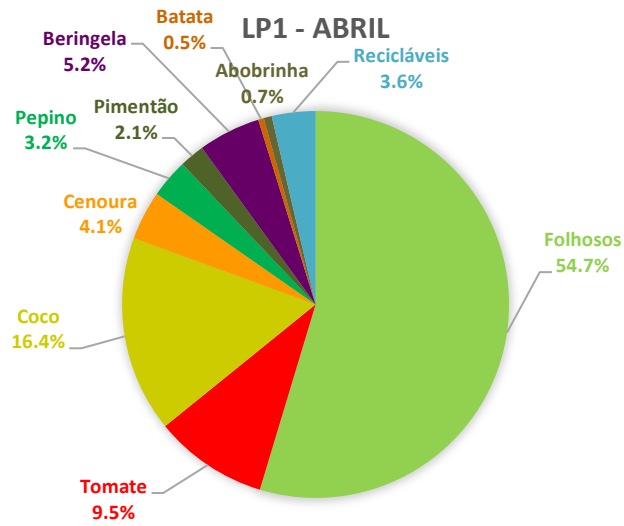
LP3 - FEVEREIRO

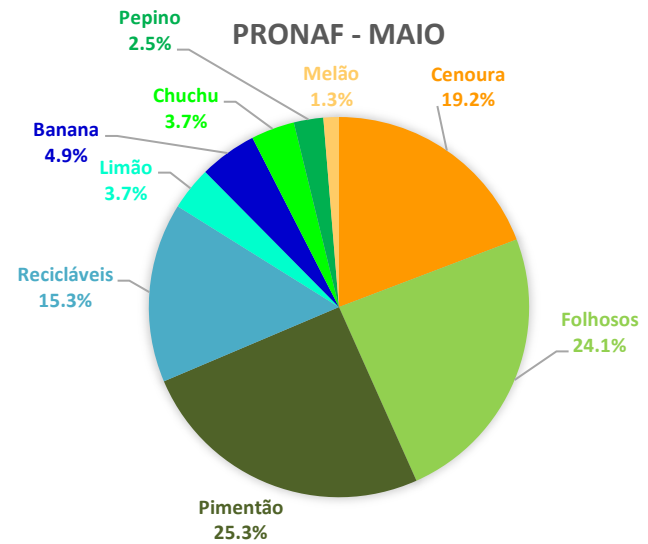
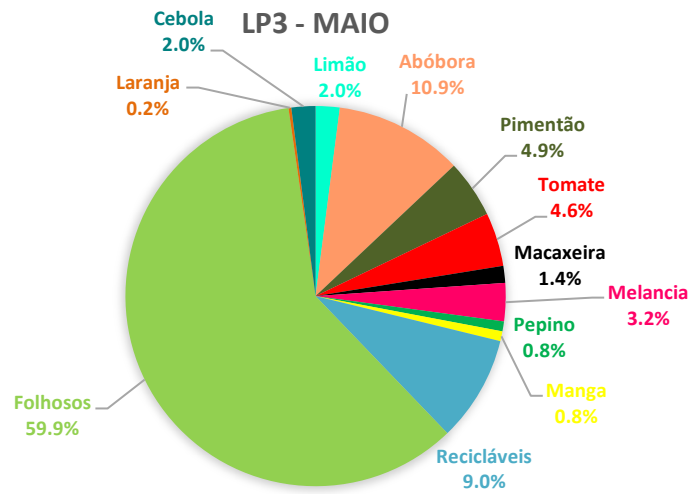
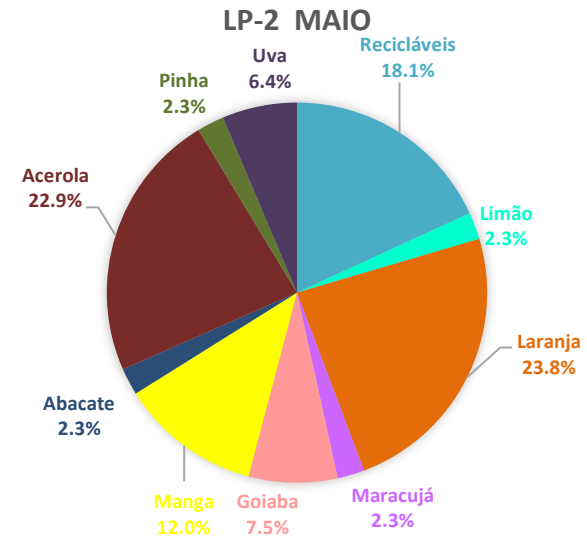
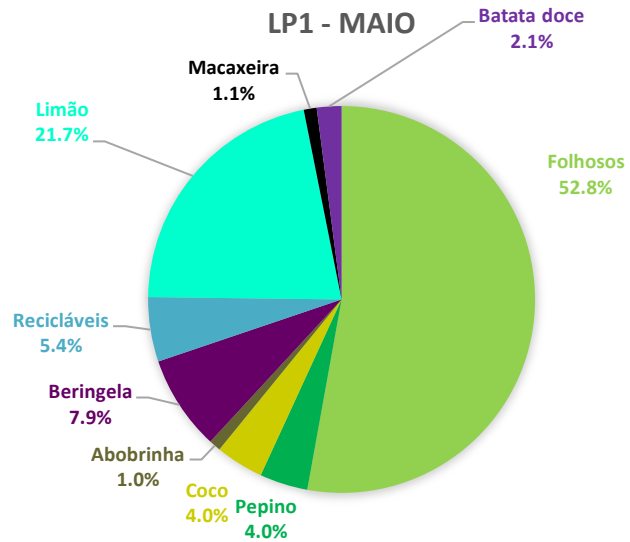


PRONAF - FEVEREIRO

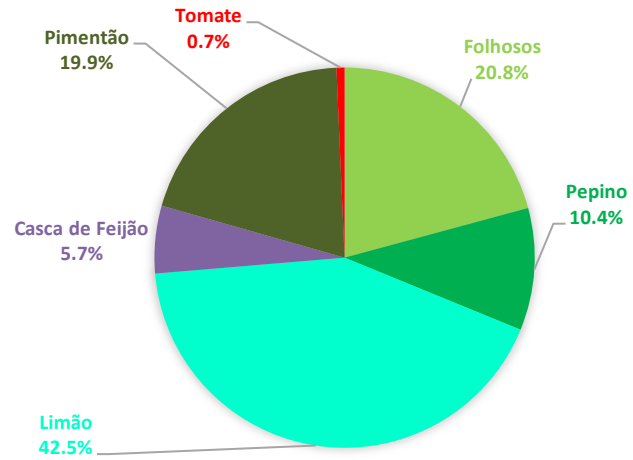




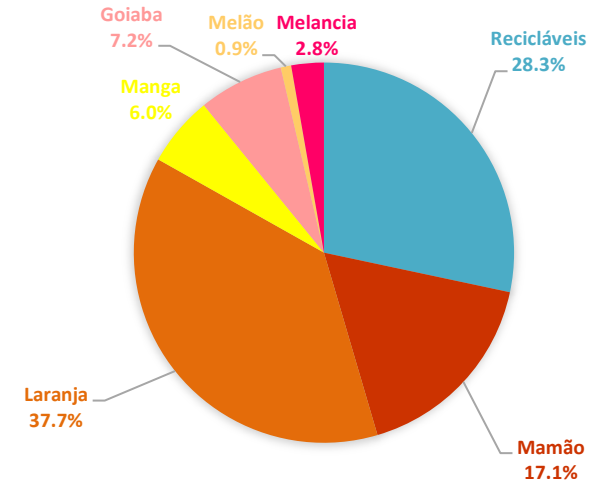




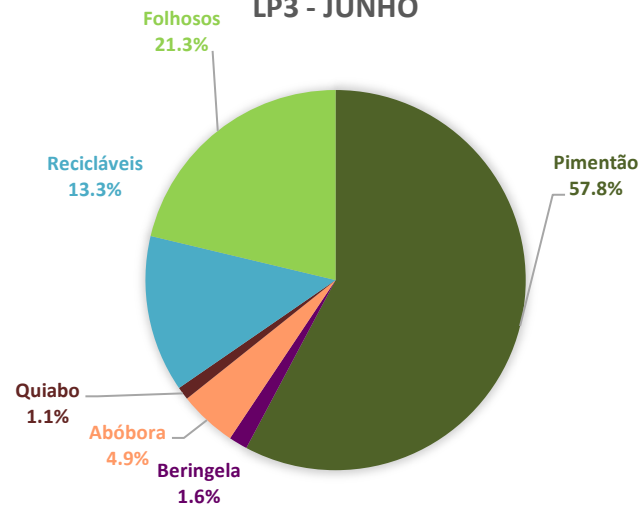
LP1 - JUNHO



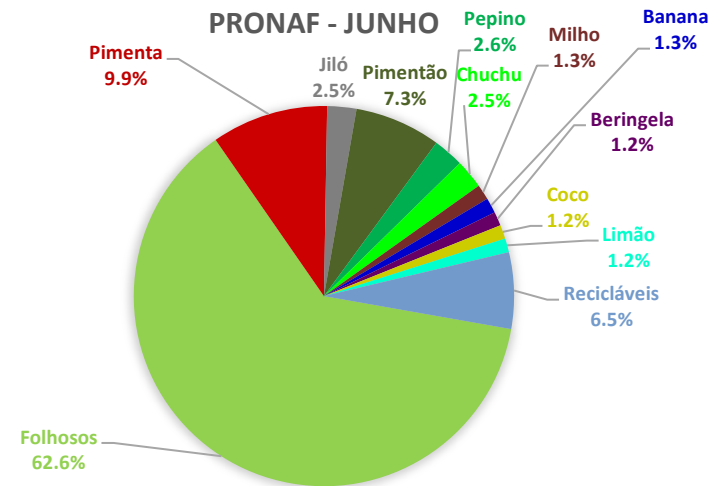
LP2 - JUNHO

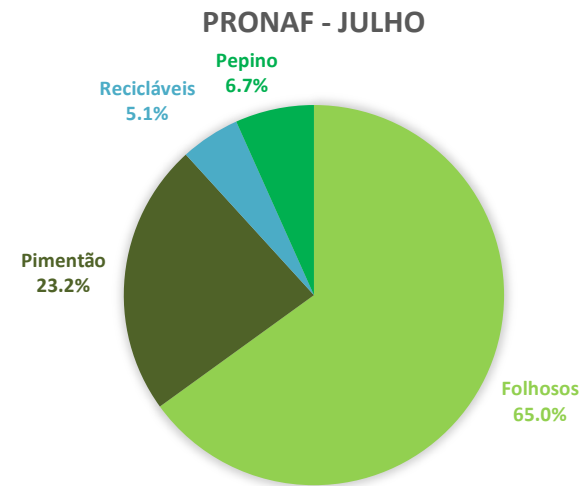
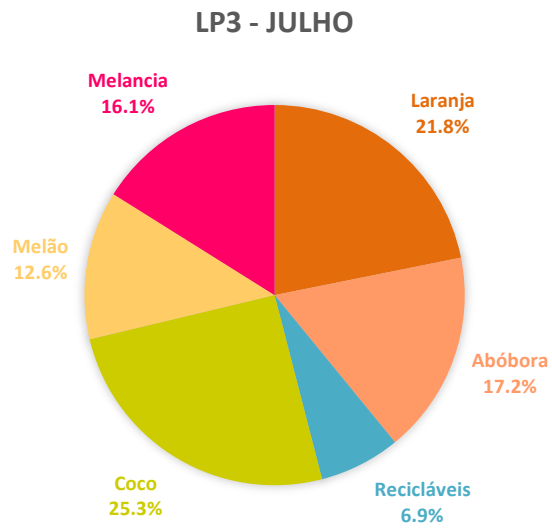
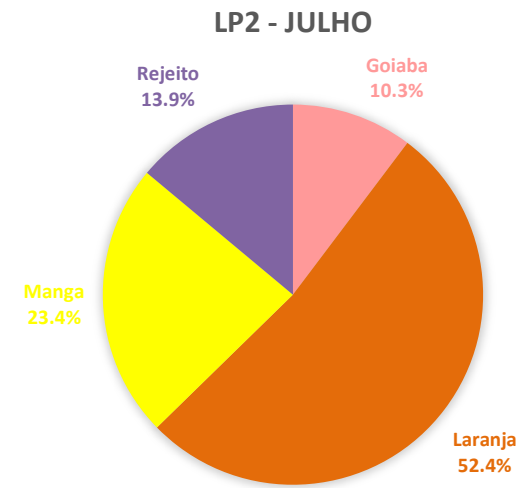
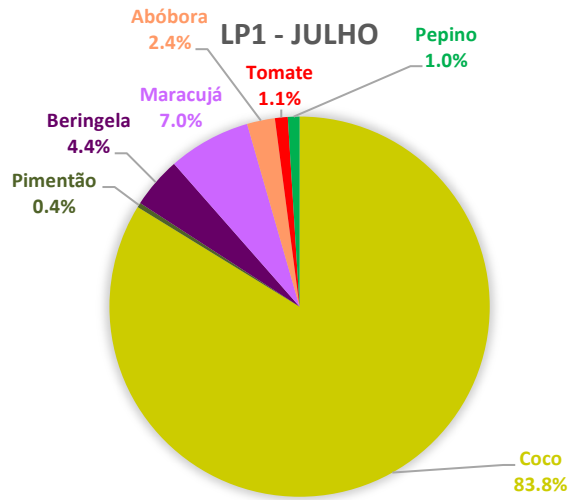


LP3 - JUNHO

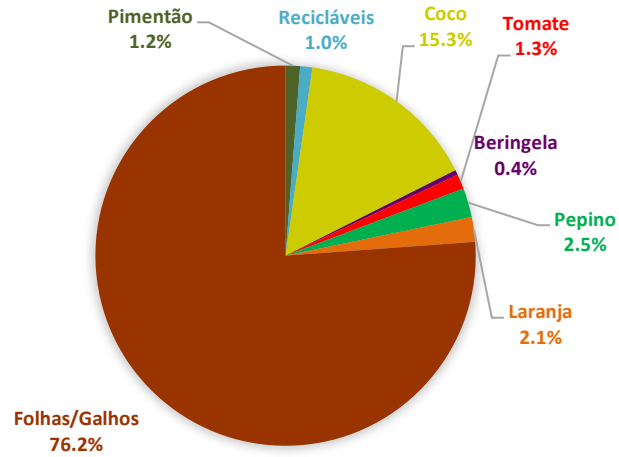


PRONAF - JUNHO

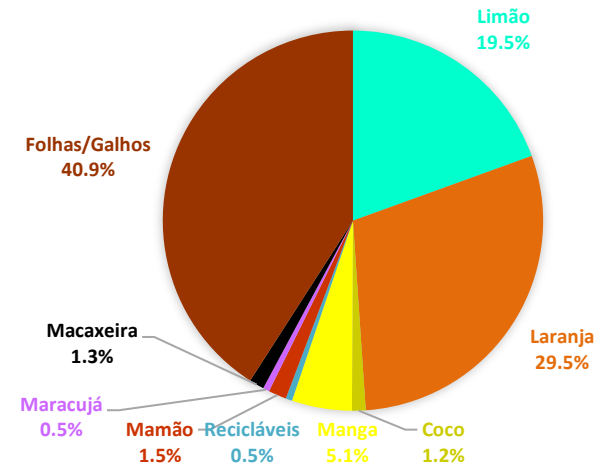




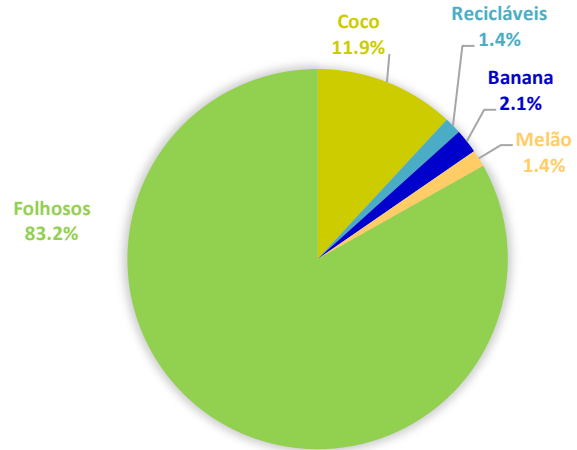
LP1 - AGOSTO



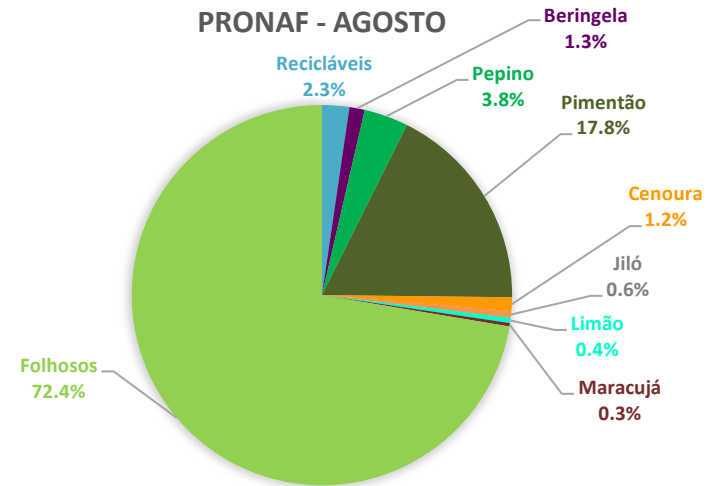
LP2 - AGOSTO

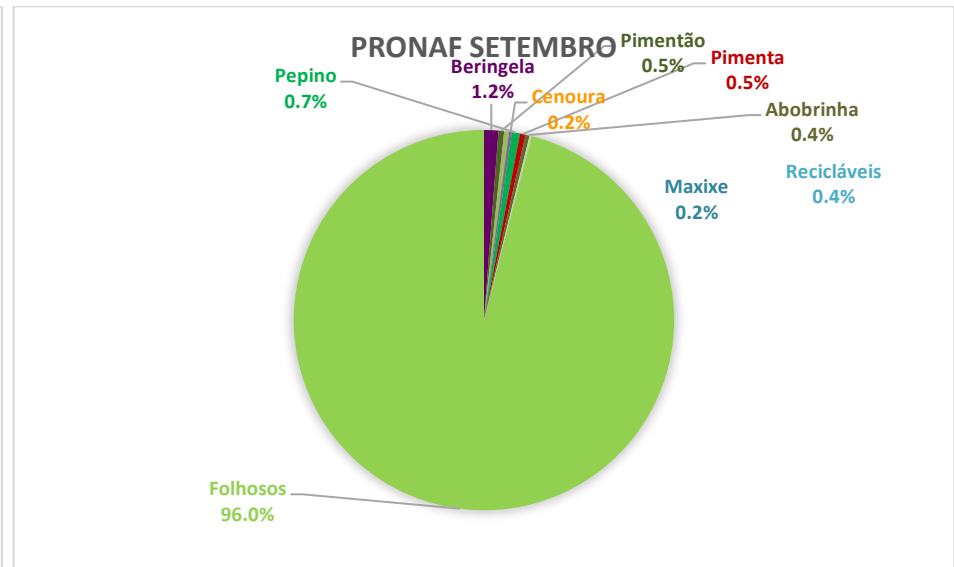
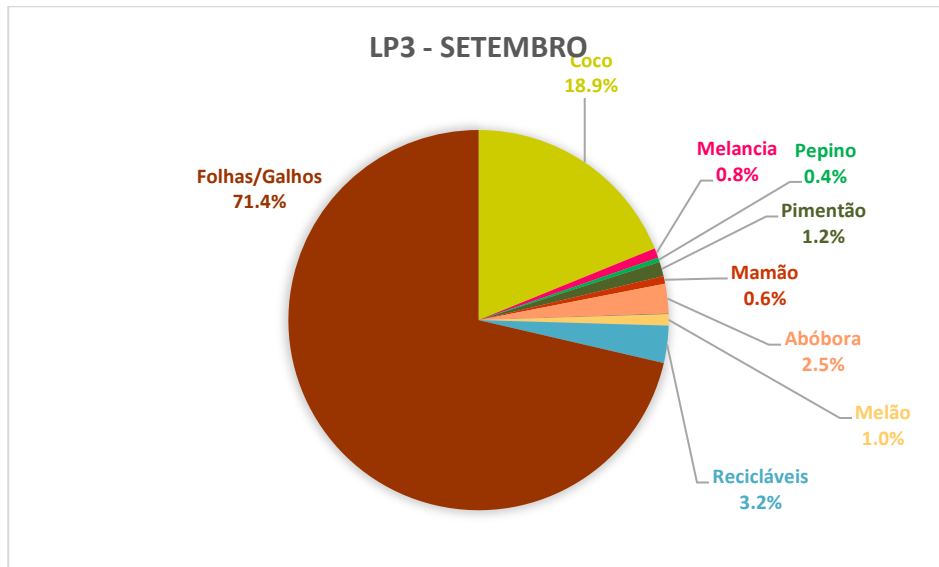
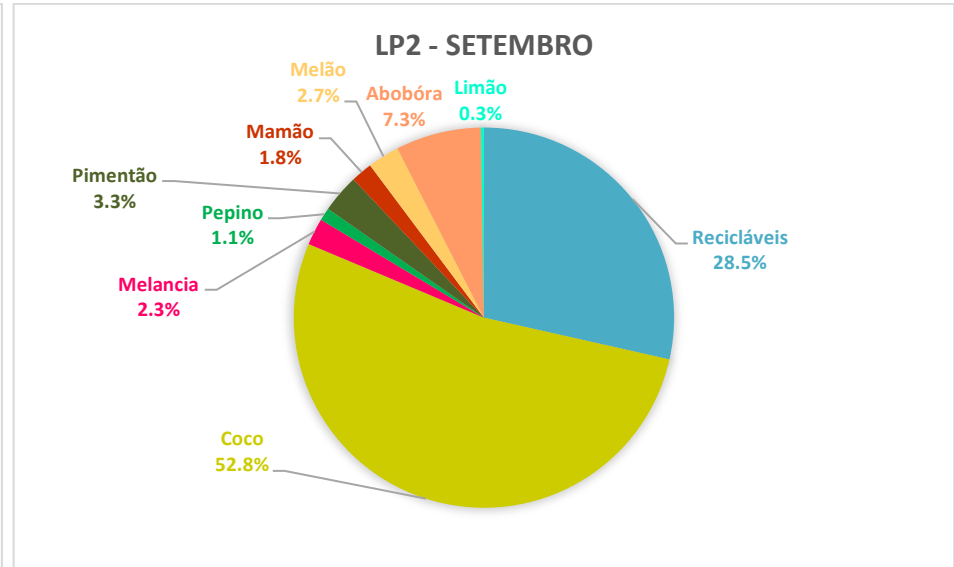
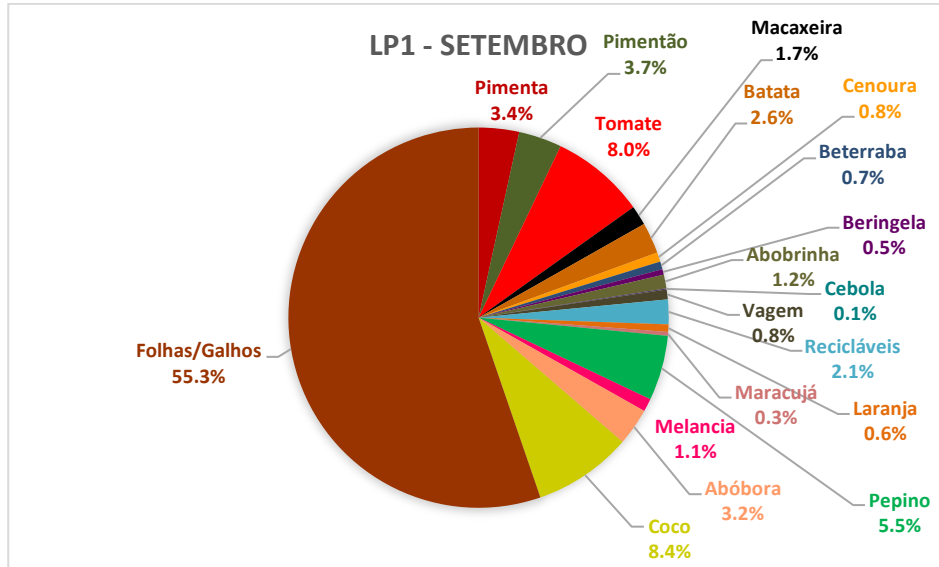


LP3 - AGOSTO

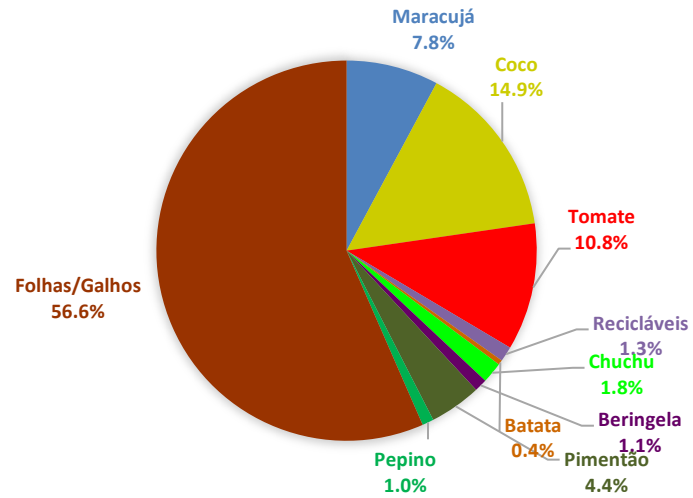


PRONAF - AGOSTO

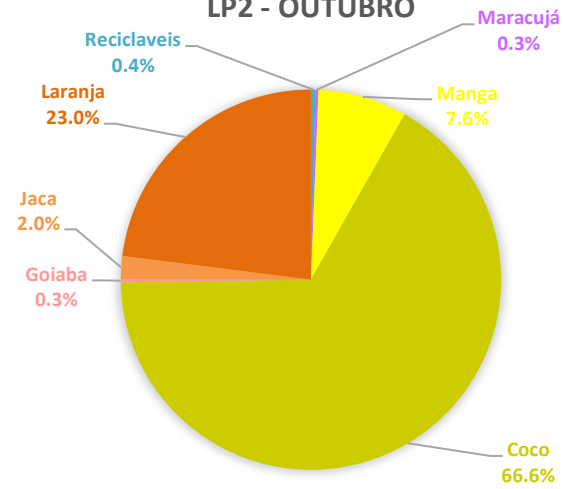




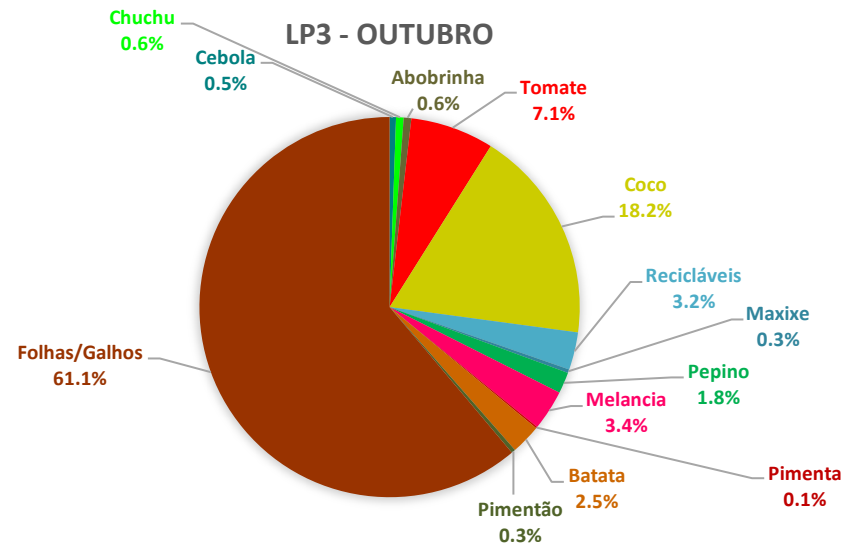
LP1 - OUTUBRO



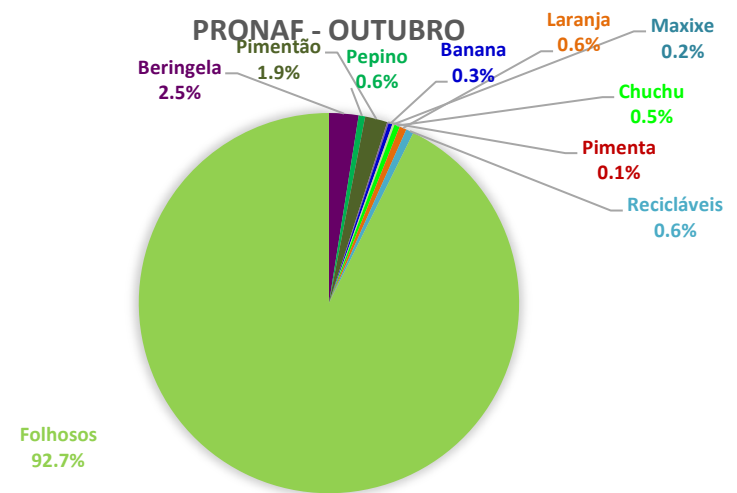
LP2 - OUTUBRO



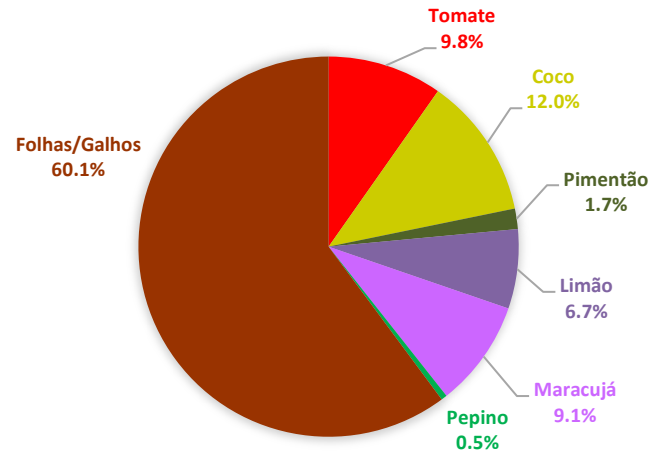
LP3 - OUTUBRO



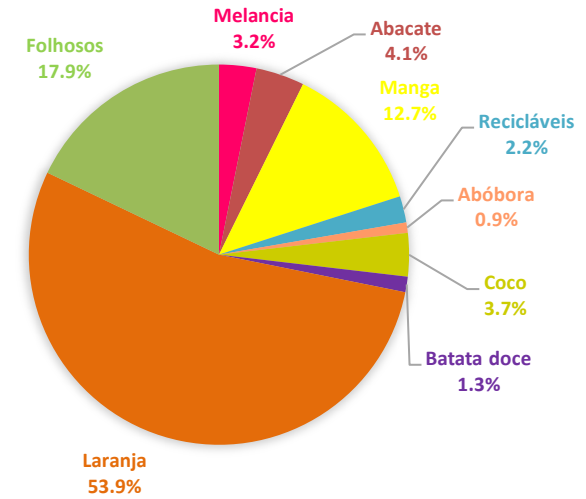
PRONAF - OUTUBRO



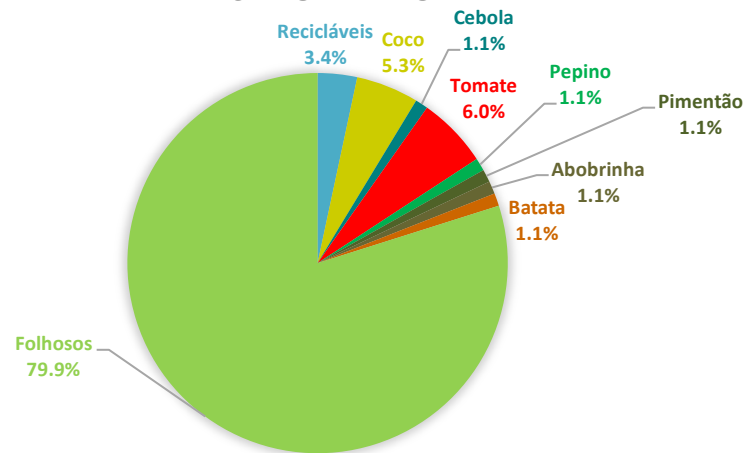
LP1 - NOVEMBRO



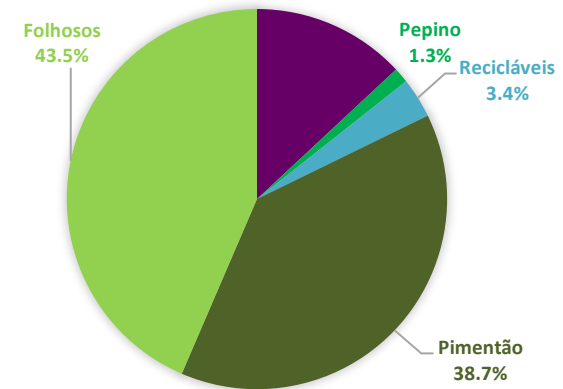
LP2 - NOVEMBRO



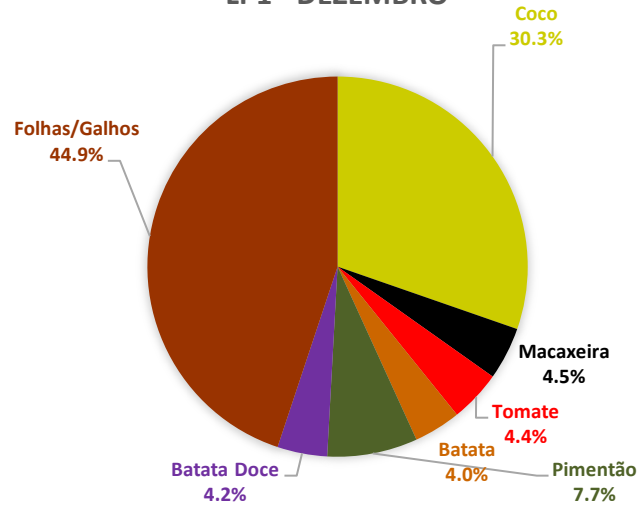
LP3 - NOVEMBRO



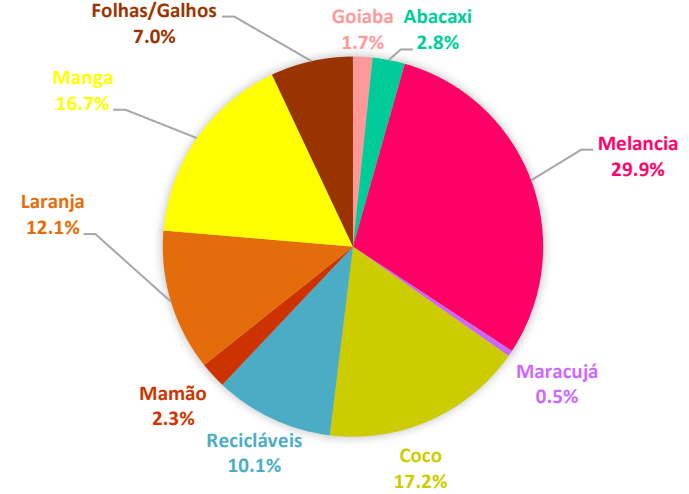
PRONAF - NOVEMBRO



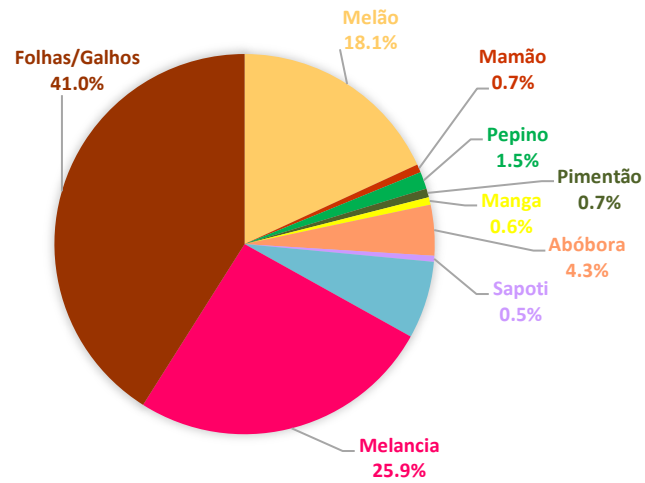
LP1 - DEZEMBRO



LP2 - DEZEMBRO



LP3 - DEZEMBRO



PRONAF - DEZEMBRO

